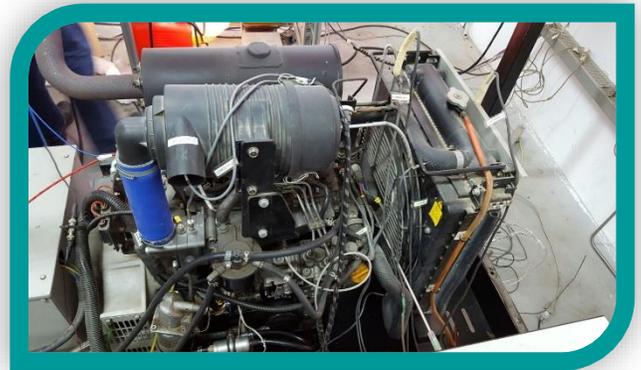


INFORME DE JUSTIFICACIÓN RETOS DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN GRUPOS ELECTROGENOS (ALTERGEN)



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
2.	RESUMEN DEL PROYECTO	3
3.	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	4
3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	4
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
4.	CRONOGRAMA	5
5.	EJECUCIÓN DEL PROYECTO	7
5.1.	PAQUETE DE TRABAJO 1. GESTIÓN Y COORDINACIÓN DEL PROYECTO	7
5.1.1.	Recopilación de normativa	7
5.1.2.	Recopilación y análisis de la información disponible de experiencias realizadas	8
5.2.	PAQUETE DE TRABAJO 2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN BASE A VARIABLES DEL COMBUSTIBLE Y PROGRAMA DE ENSAYOS.....	8
5.2.1.	Selección de las variables de interés	8
5.2.2.	Desarrollo de plantillas y herramientas de captura de datos.....	9
5.2.3.	Desarrollo de las herramientas de cálculo necesarias.....	12
5.3.	PAQUETE DE TRABAJO 3. ADECUACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE ENSAYO	13
5.3.1.	Selección y ajuste de la cadena de medida para el motor y el combustible a ensayar 14	
5.3.2.	Programación y ajuste de software de ensayo	23
5.4.	CALIBRACIÓN Y PRUEBAS CON COMBUSTIBLES CONVENCIONALES.....	25
5.4.1.	Tablas de resultados monitorizados.	27
?	ENSAYO DE COMBUSTIBLE DE REFERENCIA: PROPANO	27
?	ENSAYO DE COMBUSTIBLE DE REFERENCIA: EN 590.....	28
5.4.2.	Comparativa de emisiones: EN 590 frente al PROPANO	29
5.4.3.	Registro de datos presión cilindro	30
5.5.	PAQUETE DE TRABAJO 4. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE ENSAYOS. ANÁLISIS DE RESULTADOS... 32	
5.5.1.	Tablas de resultados monitorizados	34
5.5.2.	Comparativa de emisiones: EN 590 frente al PI100B	35
5.5.3.	Registro de datos presión cilindro	35

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe resume las actividades que CETENMA ha desarrollado al amparo del presente Convenio en relación al proyecto RETOS DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN GRUPOS ELECTROGENOS (ALTERGEN) durante el año 2017.

2. RESUMEN DEL PROYECTO

Actualmente, hay un gran interés por el uso de combustibles alternativos y se están llevando a cabo diversas líneas de investigación para dotar a los motores de combustión interna, ya sea para motores de encendido por compresión (motor diésel) o motores de encendido provocado (motores gasolina o gas) de la capacidad de funcionar con estos combustibles.

Para motores de encendido por compresión se están utilizando biodiesel (derivados de aceites vegetales, grasas, aceites reciclados), combustibles procedentes de procesos de pirolisis (derivados de biomasa, neumáticos, residuos plásticos etc.), combustibles sintéticos (F-T combustibles y DME procedentes de la gasificación de biomasa), así como etanol y butanol (si se resolvieran los problemas que supone el autoencendido). En este tipo de motores de encendido por compresión se están utilizando también combustibles gaseosos mediante la conversión de este motor a funcionamiento dual. Un motor dual es un motor diésel que consume simultáneamente combustible gaseoso y gasóleo.

Para motores de encendido provocado (motores gasolina), se está utilizando etanol (derivado de la fermentación de cereales, caña de azúcar o remolacha, procesos de digestión de celulosa o gasificación de biomasa), biogás (digestión anaerobia de plantas y animales), Gas de síntesis o SYNGAS procedente de procesos de pirolisis y gasificación, así como mezclas de combustibles convencionales para aplicaciones especiales.

Para poder evaluar la viabilidad de su uso, es imprescindible llevar a cabo un análisis exhaustivo de las condiciones de operación de los motores, así como de las consecuencias que tiene el uso de estos combustibles sobre el ciclo de vida del motor.

El objetivo del proyecto ha sido el desarrollo de los estudios necesarios para obtener información sobre la fiabilidad, la emisión de contaminantes, la eficiencia energética y la reducción en la emisión de CO₂ producida por el uso de combustibles alternativos, en particular se han evaluado combustibles líquidos procedentes de la pirolisis del tratamiento de residuos.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

3.1. Objetivo General

El objetivo del proyecto es el desarrollo de los estudios necesarios que permitan disponer de información sobre la fiabilidad, la emisión contaminantes, la eficiencia energética y reducción en la emisión de CO₂, así como de la viabilidad económica de la adaptación y/o modificación de parámetros de operación en grupos electrógenos y/o plantas de cogeneración para su funcionamiento con combustibles alternativos.

3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar la metodología de ensayo necesaria para la evaluación del uso de combustibles alternativos en grupos electrógenos y plantas de cogeneración incluyendo la caracterización básica necesaria a realizar sobre los combustibles a ensayar.
- Identificar las características físico-químicas de los combustibles que presenten una mayor influencia en las prestaciones del motor.
- Comparar los resultados de los principales parámetros de operación (consumo específico de combustible, la potencia efectiva y las emisiones de gases de la combustión) de los grupos funcionando con combustibles alternativos frente a combustibles tradicionales (p.e. diésel con diésel más SYNGAS en modo dual, GLP vs otros gases...)
- Analizar los fenómenos de combustión mediante la medida de presión-cilindro con los diferentes combustibles utilizados.

4. CRONOGRAMA

	MESES											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PAQUETE DE TRABAJO 1												
Tarea 1.1 Definición y seguimiento del plan de trabajo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tarea 1.2 Recopilación de normativa		X	X									
Tarea 1.3 Recopilación y análisis de la información disponible de experiencias realizadas,			X	X								
Entregable 1.1. Informe de marco documental												
Hito 1.1. Definición del plan de trabajo	X											
Hito 1.2 Recopilación de la información normativa disponible				X								
Hito 1.3 Selección de los combustibles				X								
PAQUETE DE TRABAJO 2												
Tarea 2.1. Selección de variables de interés			X	X	X							
Tarea 2.2. Desarrollo de plantillas y herramientas de captura de datos				X	X							
Tarea 2.3. Definir las herramientas de cálculos				X	X							

Entregable 2.1 Programa de ensayos					X							
Hito 2.1. Selección de variables				X								
Hito 2.2 Algoritmos de cálculo desarrollados					X							
PAQUETE DE TRABAJO 3												
Tarea 3.1. Selección y ajuste de la cadena de medida para el motor y el combustible a ensayar							X	X				
Tarea 3.2 Programación y ajuste de software de ensayo								X	X			
Tarea 3.3 Calibración y pruebas con combustibles convencionales							X	X				
Entregable 3.1 Ensayos de referencia con combustibles de prestaciones conocidas									X			
Hito 3.1.Puesta en marcha de la infraestructura								X				
PAQUETE DE TRABAJO 4												
Tarea 4.1. Desarrollo del programa de ensayos Análisis de resultados										X	X	X
Entregable 4.1.Informe de recopilación de los resultados obtenidos												X
Hito 4.1.Boletines de resultados de los ensayos											X	

5. EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Durante la anualidad 2017, se ha cumplido el plan de trabajo plasmado en el cronograma. A continuación, se detallan las actividades llevadas a cabo:

5.1. Paquete de trabajo 1. Gestión y coordinación del proyecto

El objetivo de este paquete de trabajo fue la de asegurar el cumplimiento del plan de trabajo propuesto a lo largo de la duración del proyecto y la ejecución de tareas administrativas relacionadas con el proyecto.

Se ejecutaron la mayor parte de las tareas programadas según el plan de trabajo previsto, si bien, algunas de ellas se desarrollaron en paralelo debido a su interrelación, en concreto tareas del paquete de trabajo 2 y 3.

En cuanto al resto de tareas, las actuaciones realizadas han sido:

5.1.1. Recopilación de normativa

Durante el desarrollo de esta tarea, se realizó un análisis de la legislación aplicable a los diferentes tipos de combustibles que pueden ser utilizados en motores estacionarios. En concreto se analizaron los requisitos de calidad que deben cumplir los combustibles en España exigidos a gasolinas, gasóleos, biodiesel y sus mezclas, fuelóleos y combustibles gaseosos (gases licuados del petróleo).

Los requisitos de calidad de estos combustibles vienen regulados en última instancia por el Real Decreto 1088/2010, de 3 de septiembre, por el que se modifica el Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, en lo relativo a las especificaciones técnicas de gasolinas, gasóleos, utilización de biocarburantes y contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo. Los aspectos más relevantes de este Real Decreto son los siguientes:

- Las propiedades de las gasolinas deberán cumplir con las especificaciones de la norma UNE-EN 228.
- Las propiedades de los gasóleos A deberán cumplir con las especificaciones de la norma UNE-EN 590.
- Las propiedades de gasóleos B y C deberán cumplir con las especificaciones del Anexo IV del mencionado Real Decreto.
- Las especificaciones técnicas para el bioetanol destinado a su utilización en vehículos a motor son las que figuran en la norma UNE-EN 15376.

- Las especificaciones técnicas del biodiesel, proveniente de ésteres metílicos de ácidos grasos - FAME, para ser utilizado en vehículos a motor son las que figuran en la norma UNE-EN 14214.
- Las especificaciones técnicas propano comercial (y GLP automoción) deben cumplir con las especificaciones del Anexo V del Real Decreto 61/2006.
- Las especificaciones técnicas butano comercial deben cumplir con las especificaciones del Anexo VI del Real Decreto 61/2006.
- Las especificaciones técnicas GLP automoción deben cumplir con las especificaciones del Anexo VII del Real Decreto 61/2006.

Esta información junto con una breve descripción de los parámetros incluidos en estas normas junto con otras características físico-químicas que presentan influencia en las prestaciones del motor se recogieron en el Entregable 1.1_MARCO NORMATIVO DEL USO DE COMBUSTIBLES EN MOTORES ESTACIONARIOS.

5.1.2. Recopilación y análisis de la información disponible de experiencias realizadas

A medida que se avanzaba en el proyecto, se recopilaba la información bibliográfica de experiencias previas del uso de combustibles alternativos en motores de combustión interna alternativos y una revisión bibliográfica sobre el fenómeno de combustión normal y anormal en motores y en los sistemas y algoritmos de medida.

La información se fue empleando para su aplicación en los algoritmos y procedimientos de ensayos que se desarrollaron.

5.2. Paquete de trabajo 2. Diseño de experimentos en base a variables del combustible y programa de ensayos

El objetivo de este paquete de trabajo es diseñar una metodología de ensayo que permita obtener información sobre los principales parámetros de desempeño del motor, así como sobre la viabilidad técnica y económica de su uso, teniendo en cuenta las necesidades de mantenimiento adicional que pudieran demandar los motores.

Durante la realización de esta tarea se llevaron a cabo las siguientes acciones:

5.2.1. Selección de las variables de interés

Partiendo del estudio de los requisitos de calidad exigibles y del análisis de la influencia de estos parámetros, sobre el funcionamiento del motor, así como de otros parámetros influyentes que

afectan directa o indirectamente a la combustión, se definieron una serie de variables a tener en cuenta para el desarrollo de los estudios.

Estas variables junto con su influencia, se recogieron en el entregable 1.1_MARCO NORMATIVO DEL USO DE COMBUSTIBLES EN MOTORES ESTACIONARIOS, junto a:

- Definición
- Unidad de medida
- Método de ensayo
- Normativa de referencia

5.2.2. Desarrollo de plantillas y herramientas de captura de datos

Esta tarea se desarrolló en paralelo a la tarea de definición de las herramientas de cálculo (tarea 2.3), partiendo del análisis de la bibliografía definida en el paquete trabajo 1. En concreto, durante el primer semestre del año, se estuvo trabajando en la preparación de los siguientes procedimientos de ensayo:

Determinación del punto muerto superior. Ensayo de motor arrastrado (PE-LM-1).

En el estudio de los procesos de combustión en los MCIA, la metodología seguida es la de diagnóstico de la combustión basado en la señal de presión de la cámara de combustión y ángulo de giro del cigüeñal. Sincronizar ambas señales resulta vital para que cálculos posteriores, como calor liberado o presión media indicada, sean correctos. Para ello fue necesario determinar el punto muerto superior (TDC), mediante el software apropiado, a través del ensayo de motor arrastrado.

La determinación del TDC, mediante el ensayo de motor arrastrado consiste en la medición de la presión en un cilindro con el motor girando sin combustión. De la curva de presión se deduce que el máximo alcanzado por la curva de presión, es decir, la presión de pico, ocurre en el TDC. Es decir, el mínimo volumen en el cilindro se da cuando la presión es máxima.

En los procesos reales, existe cierta transferencia de calor a las paredes y fugas de masa, por lo que el pico de presión, en un motor arrastrado, precede a la posición real del TDC en un ángulo determinado que depende de diversos factores como la velocidad del motor o temperatura. Este desfase entre pico de presión y TDC real es conocido como ángulo de pérdida termodinámico (TLA, Thermodynamic Loss Angle). El TLA aumenta a velocidades bajas del motor, ya que al incrementarse el tiempo del ciclo termodinámico, existe también mayor tiempo para pérdidas de calor y presión.

El método más extendido para el cálculo del TLA es el método de la bisección, que interpola los datos de presión con motor arrastrado en un rango de 15°CA y 3°CA en referencia al pico de presión, antes y después del TDC, para determinar el ángulo del cigüeñal al que correspondería cada valor de presión de la rama de compresión en la curva de expansión. Para cada par de valores se calcula su valor medio, siendo la posición real del TDC el valor medio de todos los ángulos calculados.

En el anexo 1_DETERMINACIÓN DEL PUNTO MUERTO SUPERIOR, se recoge toda la información referente a este procedimiento.

Procedimiento de ensayo para medida de Knocking (PE-LM-2)

Este método trata de caracterizar numéricamente la intensidad de la combustión detonante a partir de la presión en el cilindro en función del ángulo girado por el cigüeñal, y para diferentes cargas, a través de un índice llamado Knock Number (KN).

A diferencia de la combustión normal, que comienza en el instante en que salta la chispa y avanza gradualmente hasta alcanzar las demás zonas de la cámara, en la combustión anormal, una vez saltada la chispa, avanza de manera irregular o bien no es provocada directamente por la chispa, sino que obedece a otras causas.

En los procesos de combustión anormal, los dos fenómenos más relevantes son la autoinflamación o autoencendido y el encendido superficial. Si son severos pueden ocasionar daños en el motor, como grandes averías en la culata o en el pistón, y pasan a denominarse combustión detonante o detonación.

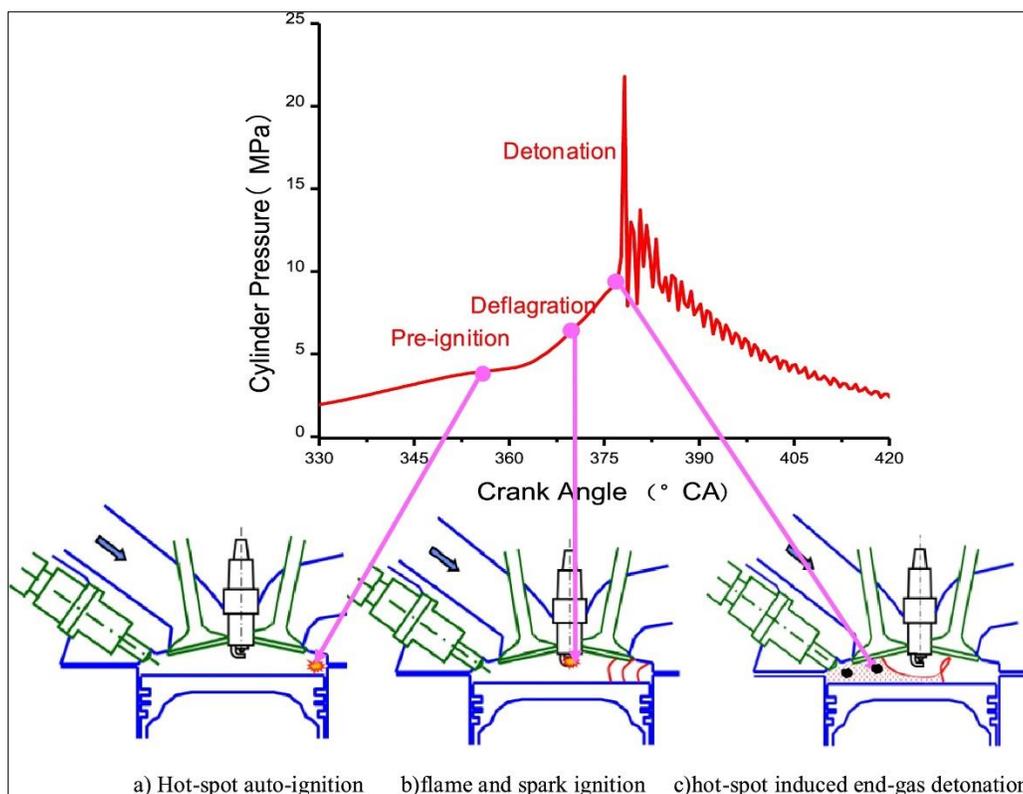


Ilustración 1: knocking

El fenómeno de la detonación es una limitante en cuanto a la máxima relación de compresión que puede utilizarse en los diseños de los motores de combustión interna de cuatro tiempos de encendido por chispa. (Fuente: An Introduction to Engine Testing and Development, Richard D. Atkins, 2009).

En el anexo 2_ MEDIDA KNOCKING, se recoge toda la información referente a este procedimiento.

Procedimiento de ensayo para medida de misfire (apagado de llama) (PE-LM-2)

En el estudio de los procesos de combustión anormal de los MCIAs, una de las anomalías que podemos encontrar es el fenómeno de misfire o apagado de llama. En este procedimiento se está trabajando en un método para su detección a partir de la señal de presión en el interior del cilindro en función del ángulo girado por el cigüeñal. Este fenómeno ocurre cuando el calor perdido es mayor al calor producido.

En la siguiente ilustración se observa una representación gráfica, a modo de ejemplo, de ciclos en los que se produce apagado de llama. En los ciclos que se produce este fenómeno la presión disminuye bruscamente.

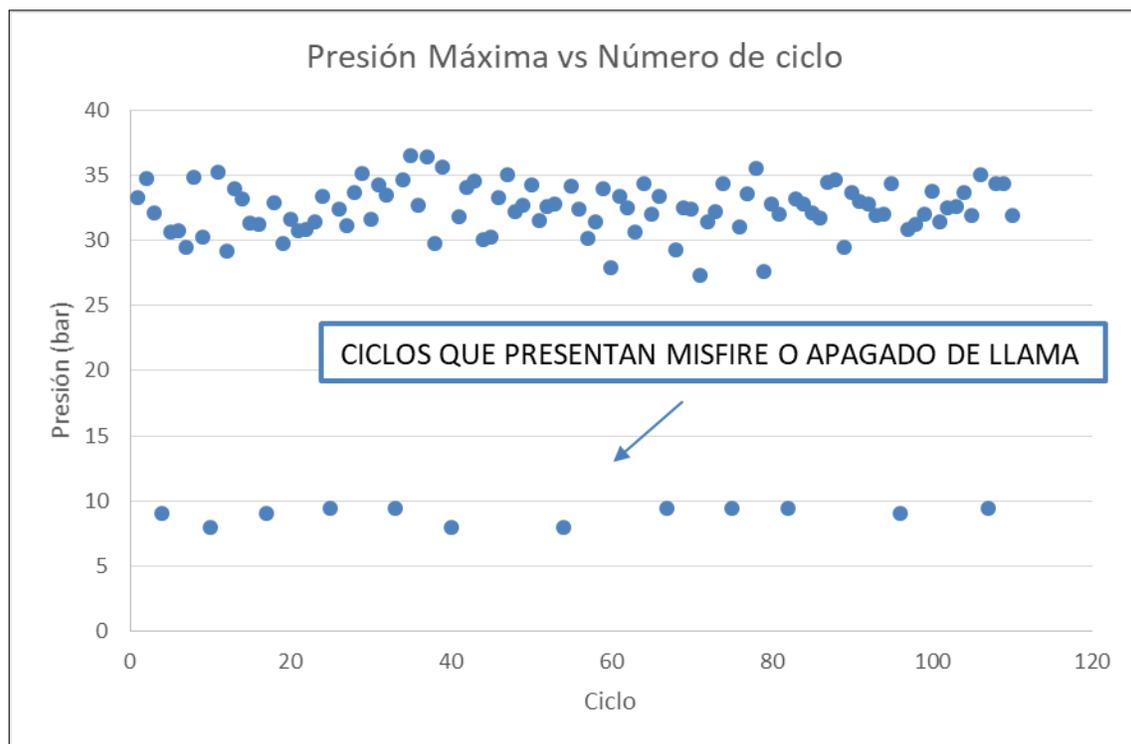


Ilustración 2: Ciclos en los que se produce apagado de llama.

En el anexo 3_ MEDIDA MISFIRE, se recoge toda la información referente a este procedimiento.

5.2.3. Desarrollo de las herramientas de cálculo necesarias.

En paralelo al desarrollo de los procedimientos de ensayo, se desarrollaron las hojas de cálculo necesarias para realizar el análisis a partir de los datos registrados en el banco de ensayos.

Dichas hojas recogen los cálculos y la información de soporte para analizar e interpretar los datos.

En el caso del ensayo de determinación del Punto Muerto superior, los cálculos se implementaron en el software de ensayo para ligar el resultado al resto de ensayos a realizar.

En la siguiente ilustración se muestra un ejemplo del modelo de hoja de ensayo.

PE-LM-02

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO KNOCKING

Número de ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\sum_{i=1}^{20} P_i - P_{i+1} $	42,0396	41,13489	38,79475	38,19493	36,71338	35,65132	34,70022	42,83712	35,72556	41,59034	43,27721	33,54552
$\sum_{i=1}^{20} P_{i+1} - P_{i-1} $	15,30608	19,90367	15,93038	19,20877	15,62665	16,281	15,77022	17,85241	15,3381	16,18467	18,56041	15,53
KNOCK NUMBEF	26,73352	21,33122	22,86436	18,98616	21,08674	19,37031	18,93	24,98472	20,38746	25,40568	24,71681	18,01552
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
RESUMEN	KN MIN	KN MAX										
	9,413308	30,34672										
Número de ciclos con KN>10	109	ciclo 88										

with reciprocating engines, may be of further assistance.

4. DEFINITIONS.

a. Detonation. The spontaneous combustion of an unburned charge which occurs ahead of the flame front after normal ignition. Frequency and severity of detonation is defined as follows:

5-9 flashes/minute = incipient detonation; 10-20 flashes/minute = limiting detonation.

Buscamos el KN máximo. Para KN>10 se considera knocking
 #En cuántos ciclos debe haber

Método Hoja1 720° Pi ABS(Pi-Pi+1) P-i ABS(P-i-P-i-1) **KnockNumber** datos cicl ...

Ilustración 3: Desarrollo de herramientas de cálculo

5.3. Paquete de trabajo 3. Adecuación de la infraestructura de ensayo

El objetivo de este paquete de trabajo, fue adecuar la infraestructura de ensayo existente, para la evaluación de los combustibles seleccionados con los experimentos definidos en las tareas anteriores.

Durante la realización de los ensayos, se hicieron una serie de modificaciones en la organización del laboratorio de motores con el fin de trabajar de manera más cómoda y segura para lo cual fue necesario la adquisición de diferente material eléctrico y de taller.

Se instaló una bandeja en el techo y se revisó todo el cableado de los diferentes equipos de media para conducirlo por encima del banco de ensayos para evitar la conducción de cables por suelo o sobre el motor.¹

Entre el pequeño equipamiento de taller adquirido se puede destacar un endoscopio², polipasto manual³, cargador de baterías y pequeñas herramientas de mano.

¹ Factura SUMINISTROS ELECTRICOS BAÑOS SL F 2017/1350

² Factura AMIDATA SAU F1700668

³ Factura FERREGAS GARCIA-VASO SL F 1700086

(footnote continued)



Ilustración 4: Nueva estructura del banco de ensayos del laboratorio de motores de CETENMA

5.3.1. Selección y ajuste de la cadena de medida para el motor y el combustible a ensayar

A pesar de que estaba previsto que el comienzo de esta tarea fuera en el mes de mayo, se comenzó con las tareas de ajuste de la cadena de medida en el mes de enero para la evaluación de combustibles gaseosos.

Para ello se adquirieron los elementos necesarios para la adaptación de la línea de alimentación de combustibles gaseosos existente para su uso con combustibles derivados del petróleo y suministrados en otros formatos diferentes a las botellas B200, empleadas normalmente.⁴

⁴ Factura 1700148 ISPER SOLDADURA SL

Una vez realizada la adaptación de la línea, se integró en el banco de ensayos una báscula de pesaje para medir el consumo del motor por el método gravimétrico a partir de la diferencia de pesaje de la botella.



Ilustración 5: Imagen de la balanza empleada

La báscula disponible, que fue calibrada externamente, presenta un rango de 0-60 kg por lo que actualmente este sistema de medida solo se puede emplear con botellas comerciales de 12,5 y 35kg.

Dentro de esta tarea, también se realizó la adaptación de la cadena de medida para integrar la nueva instrumentación de medida de presión cilindro y la sincronización de las lecturas.

El esquema de la cadena de medida actual se muestra en la ilustración 5.

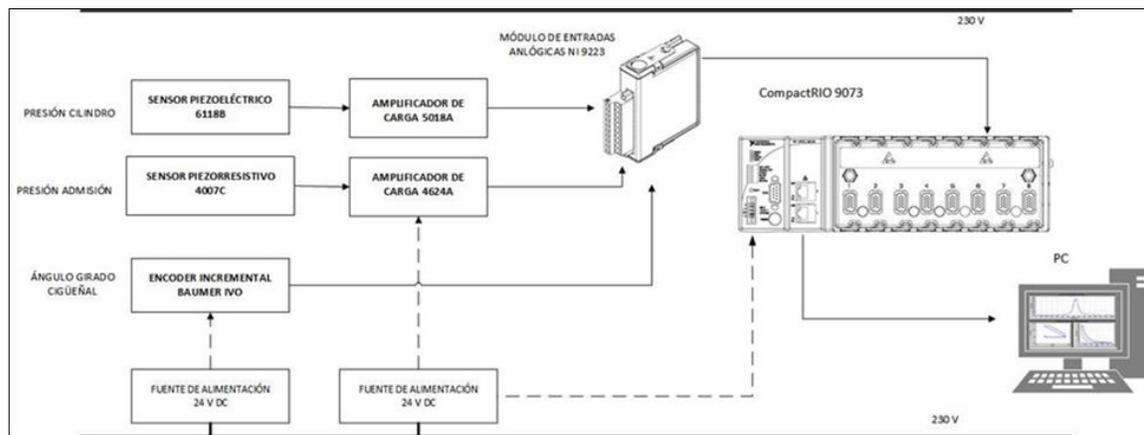


Ilustración 6: Cadena de medida de presión cilindro para MEP

Entre los elementos más destacables que se integraron en el laboratorio se encuentra:

Sensor de presión en el cilindro.

El sistema de medida de presión en el cilindro varía en función del tipo de combustible y del tipo de motor a emplear. En primer lugar se trabajó con combustibles gaseosos en un motor de encendido provocado.

En este caso se empleó un sensor piezoeléctrico de presión relativa de la marca KISTLER modelo 6118B, capaz de medir diferencias de presión de hasta 200 bar. Este sensor va integrado en una bujía lo que permite su uso sin necesidad de mecanizar la culata para realizar su integración, pero si fue necesario la adquisición de un prolongador de cable para poder realizar su instalación⁵

En el caso de combustibles líquidos se empleó un sensor piezoeléctrico PCB modelo 112B10 integrado en la culata del motor para lo que fue necesario la adquisición de las herramientas de mecanizado y montaje⁶.

Este tipo de sensores son generadores, es decir, no necesitan alimentación exterior ya que generan, como respuesta a la deformación, una carga eléctrica proporcional a la presión que actúa sobre las caras del elemento sensor.

Sus principales inconvenientes son, por un lado, que precisan de un nivel de referencia con respecto al cual hay que reducir las fluctuaciones medidas, y por otro, que poseen una impedancia de salida muy alta, lo que les hace muy sensibles a ruidos eléctricos.

La señal que proporcionan los transductores piezoeléctricos, no puede ser utilizada directamente como entrada de los convertidores analógico/digitales, ya que debido a la capacidad que presentan, tanto los cables de conexión como el convertidor a su entrada, se produciría una atenuación considerable de la señal, por lo que se precisa de un amplificador de carga, cuyas funciones principales son convertir la carga eléctrica en tensión, amplificar la señal y proporcionar una impedancia de salida baja apropiada para la entrada de los sistemas de medida.

En nuestro caso, se instaló el amplificador de carga disponible KISTLER, 5018.

⁵ Factura Kistler F3409003805

⁶ Incluido Kistler F3409003805

A continuación, se puede visualizar la instalación de este sensor en el motor donde se realizaron los ensayos de los combustibles líquidos.



Ilustración 7: Herramienta necesaria para la instalación del sensor presión cilindro

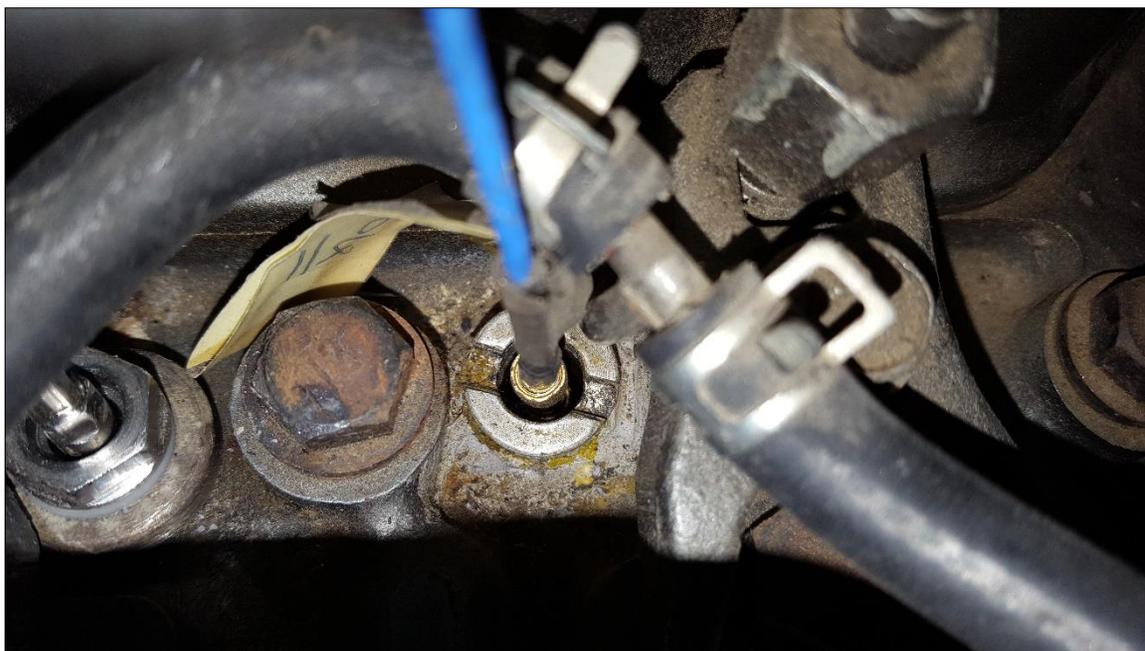


Ilustración 8: Sensor presión cilindro instalado

Sensor de presión en la admisión.

La presión dinámica en la admisión, será la presión de referencia para la presión en el cilindro. Para la medida de la presión en la admisión, se pueden emplear transductores piezorresistivos, los de galgas semiconductoras o los de galgas conductoras. Convierten un desplazamiento ocasionado por una deformación mecánica, en una señal eléctrica, cuya magnitud es proporcional a la deformación producida.

En nuestro caso, se integró el sensor disponible KISTLER modelo 4007C ubicado en la cámara de admisión, que mide la presión absoluta en un rango de 0 a 5 bar, junto con su correspondiente amplificador de carga.



Ilustración 9: Sensor de presión de admisión



Ilustración 10: Amplificador para sensor piezorresistivo

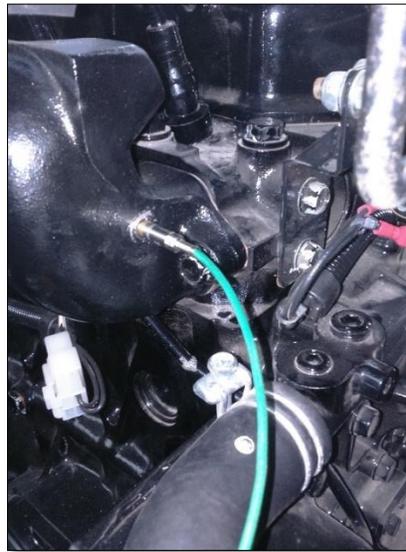


Ilustración 11: Sensor instalado en colector de admisión

La ilustración anterior del sensor instalado en el colector de admisión corresponde al grupo electrógeno utilizado para la realización de los ensayos del combustible gaseoso.

En las siguientes dos ilustraciones, se observa la instalación del sensor de la presión de admisión en el grupo electrógeno utilizado para los ensayos de los combustibles líquidos.

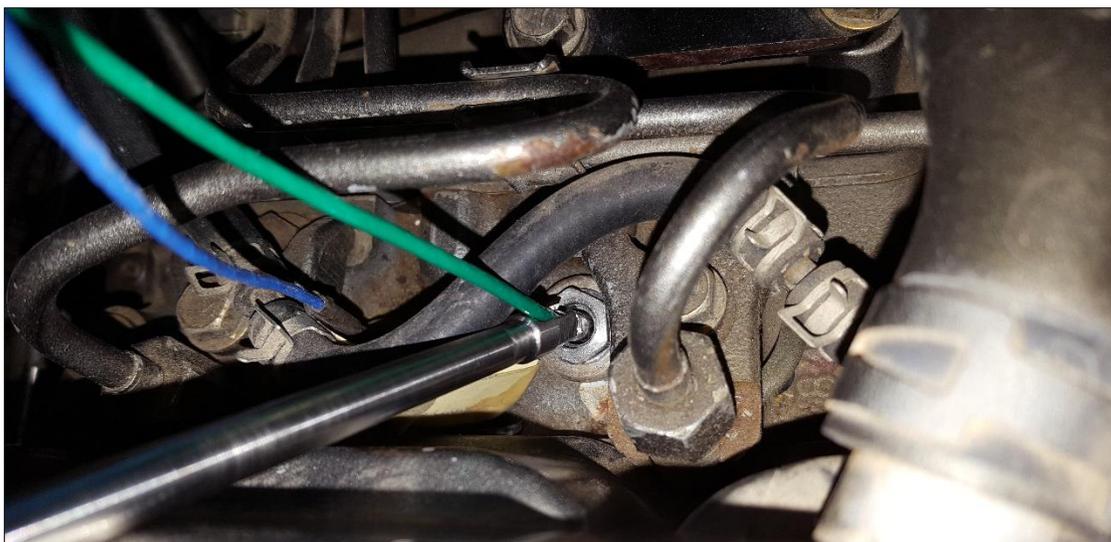


Ilustración 12: Herramienta necesaria para la instalación del sensor de presión en colector de admisión

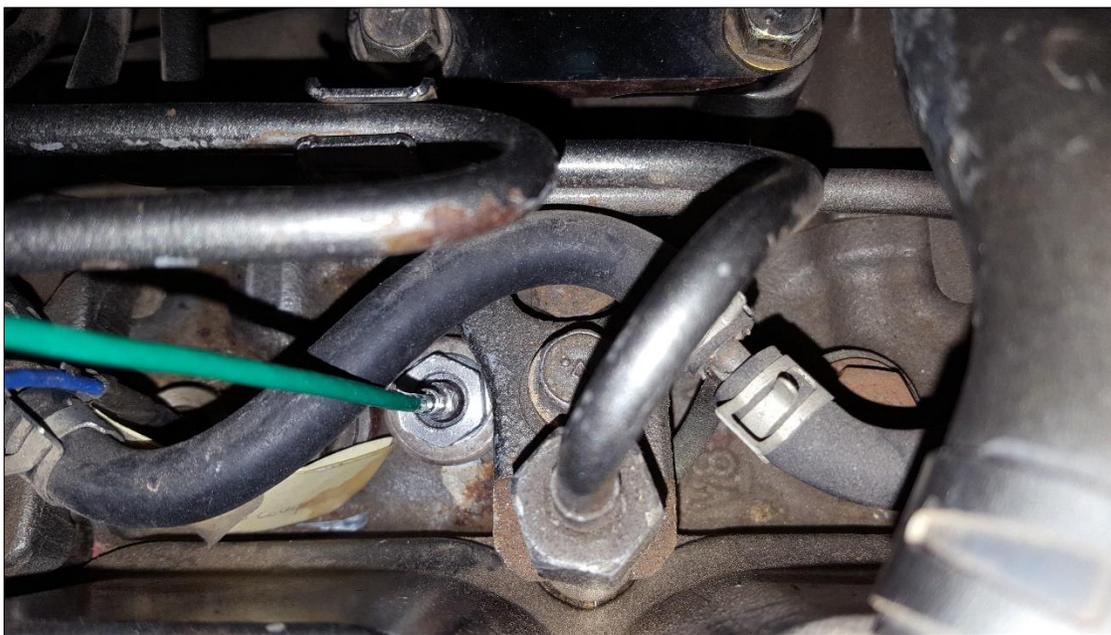


Ilustración 13: Sensor de presión del colector de admisión instalado

También se realizó la integración de un codificador incremental marca BAUMER IVO modelo GI342.N707113000⁷, para realizar la medida de la posición del ángulo del cigüeñal con una resolución de 360 pulsos por vuelta, y también, dispone de un pulso de información por vuelta (trigger) para propósitos de sincronización. Con este equipo se alcanza una resolución angular 1º.



Ilustración 14: Encoder incremental Baumer empleado

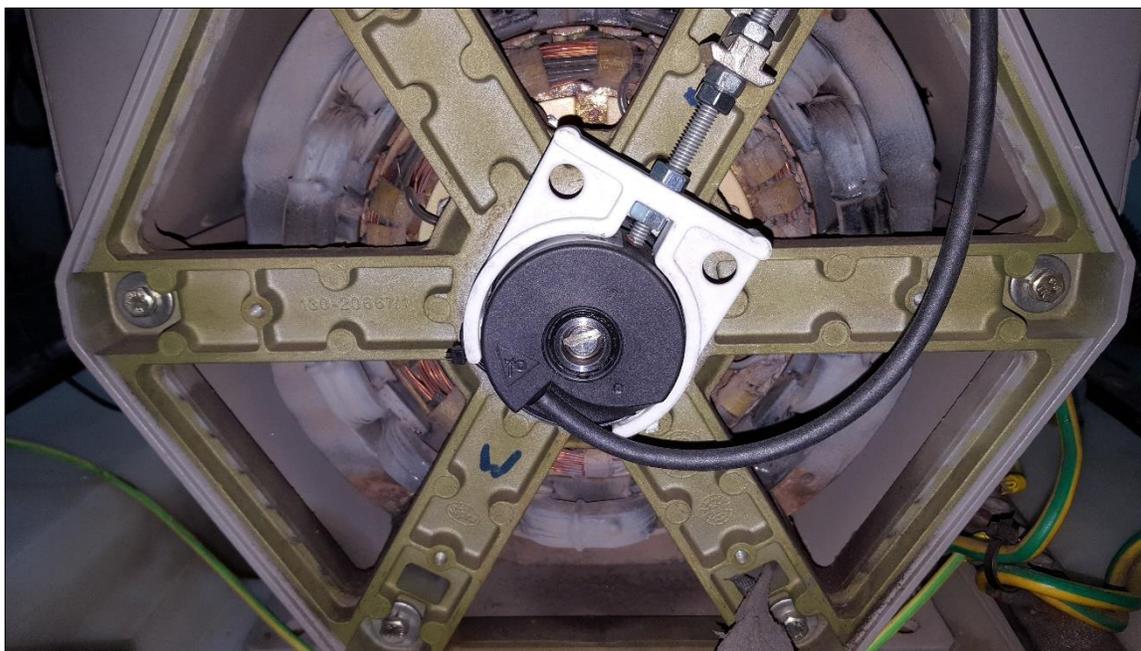


Ilustración 15: Encoder incremental Baumer instalado

⁷ FACTURA TECNOLOGIAS DE CONTROL Y ACCIONAMIENTOS SL 1700480

Al detectarse necesidades durante el desarrollo de los ensayos, se realizaron algunas modificaciones sobre la instrumentación.

La principal ha sido la instalación de sensores de temperatura⁸, en concreto termopares tipo k, en el colector de escape y en la salida de cada uno de los cilindros en el motor empleado para la evaluación de combustibles gaseosos. Con el registro de estas variables, se pretende detectar fenómenos de combustión anormal en alguno de los cilindros, en concreto apagado o misfire.

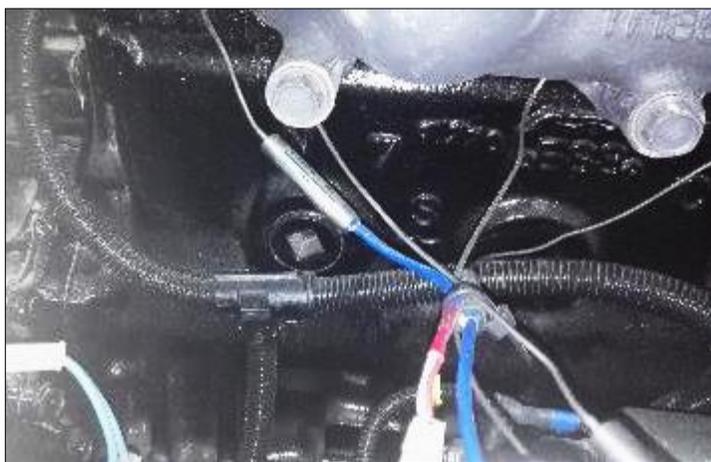


Ilustración 16: Sensores de temperatura en colector

Dentro de las tareas de ajustes de la cadena de medida también se realizó el ajuste del analizador de gases de combustión Testo 350 por parte del proveedor del equipo⁹.

⁸ FACTURA TC DIRECT 1700722

⁹ FACTURA INSTRUMENTOS TESTO SA 1700353

5.3.2. Programación y ajuste de software de ensayo

Se adaptó el software de ensayo para poder integrar la nueva instrumentación y se desarrollaron nuevas aplicaciones para poder realizar los ensayos previstos.

Se desarrolló una aplicación dedicada a la medida de todas las señales de alta velocidad, para poder realizar la sincronización de las señales. En la siguiente ilustración se muestra la pantalla de la aplicación desarrollada.

Se modificó la aplicación existente de centrado de señal para poder realizar el cálculo del PMS conforme al procedimiento desarrollado, tomando como referencia para la sincronización, los pulsos obtenidos del nuevo encoder.

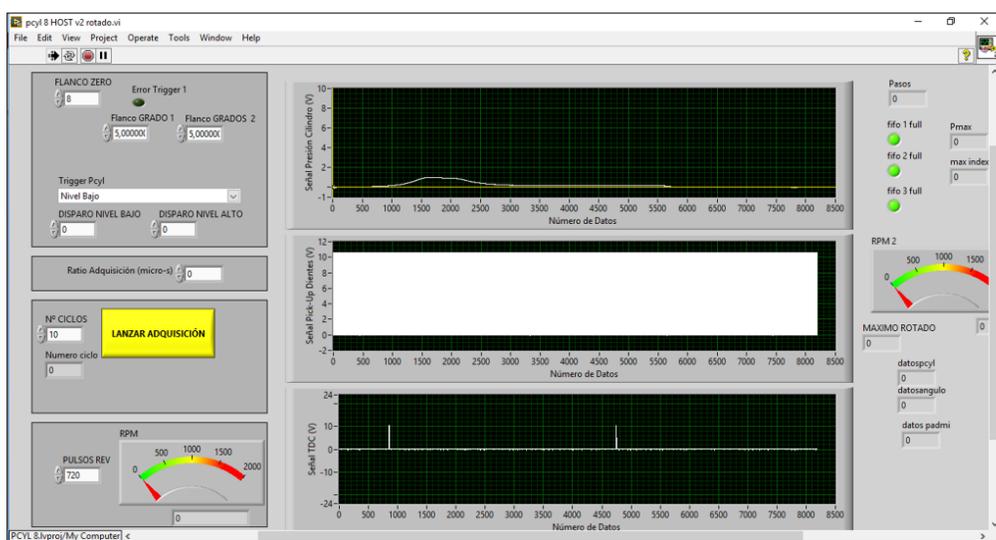


Ilustración 17: Imagen de programa desarrollado para análisis de las señales de alta velocidad

Esta modificación del procedimiento de referenciado de señales, se tuvo que implementar en el software de medida de presión cilindro. Para ello, se desarrolló otra aplicación que permite evaluar la medida continua de la presión en el cilindro y la presión de admisión con el nuevo sistema de referencia.

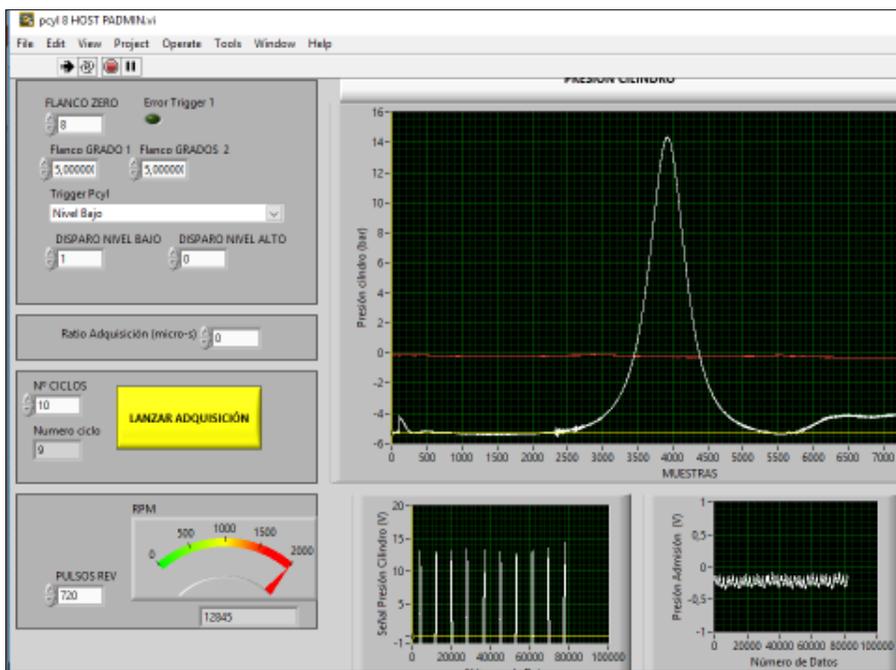


Ilustración 18: Imagen de programa de medida en continuo de presión cilindro

Una vez válidos los algoritmos empleados para el referenciado de señales, se realizaron las modificaciones en las aplicaciones existentes para el cálculo del TDC, y para medida y registro de presión cilindro.

En el proceso de revisión del programa de medida de presión cilindro, se introdujeron otras modificaciones como son el registro de las señales para todos los ciclos de medida (en la actualidad trabajamos con un mínimo de 120 ciclos), frente al registro medio que se realizaba antes.

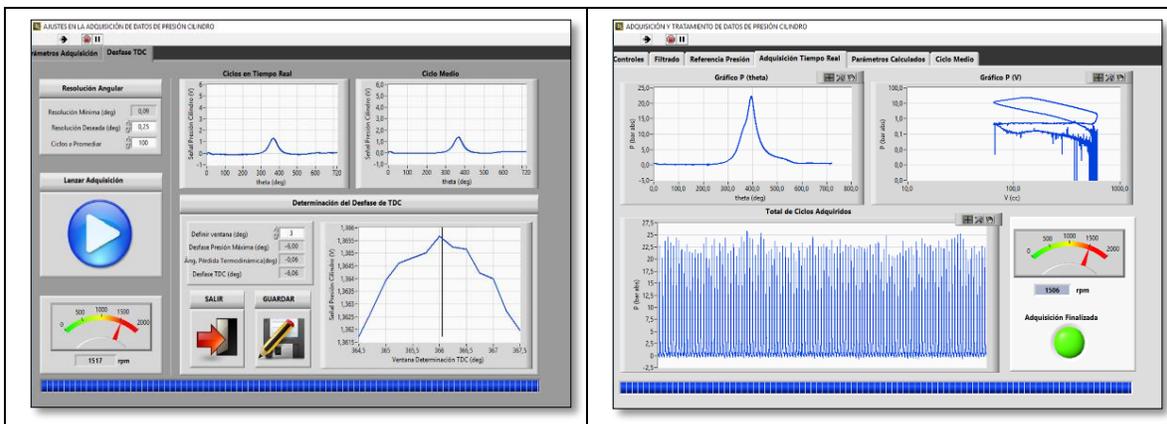


Ilustración 19: Pantallas de los programas modificados.

También se desarrolló una aplicación para el registro de los valores de pesaje de la balanza para el cálculo del consumo de combustible.

En paralelo con la calibración de los combustibles convencionales, se realizaron los ajustes necesarios sobre la aplicación para solucionar problemas detectados como preparar la aplicación para ampliar el registro de todos los ciclos registrados, de manera que se pudiese realizar un análisis de las variaciones ciclo a ciclo. Este registro se realiza en formato .csv registrando todos los puntos del ciclo (8400 para la resolución máxima de 0.1º) de las siguientes variables:

- Presión cilindro
- Presión de admisión
- Posición del cigüeñal

Finalizando las tareas de calibración con los combustibles convencionales, se realizaron los ajustes necesarios sobre la aplicación para solucionar problemas detectados.

5.4. Calibración y pruebas con combustibles convencionales

Para la validación de las modificaciones realizadas en la programación, se realizaron las pruebas con combustibles gaseosos convencionales y con combustibles líquidos convencionales (EN 590), en concreto se ha trabajado con propano 100% y con propano comercial (80-20) adquiridos a nuestro proveedor de gases¹⁰ y con combustible diésel procedente de diferentes estaciones de servicio¹¹.

Antes de su ensayo, los combustibles fueron caracterizados subcontratando parte de los análisis a la Universidad ¹².

Se comenzó con los ensayos de los combustibles gaseosos, realizando ambos con diferentes cargas y con diferentes condiciones de temperatura ambiente, con el objetivo de ver la influencia de esta variable en la operación.

¹⁰ Facturas Carbuos Metálicos 1700323, 1700375 , 1700122 , 1700041, 1700490

¹¹ Facturas 1700338, 1700166, 1700401

¹² Facturas Universidad Politécnica de Cartagena F170006 F1700432 F1700635

Los ensayos se repitieron instalando la bujía instrumentada en cada uno de los cilindros, para detectar variaciones en el proceso de medida.

La secuencia de ensayos realizada fue la siguiente:

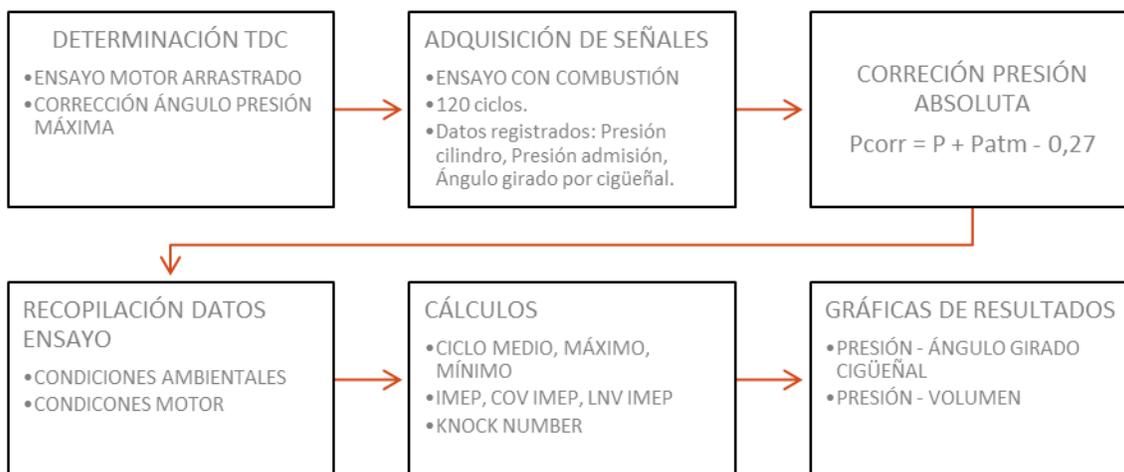


Ilustración 20: Secuencia de ensayos

En total se realizaron 9 ensayos para diferentes grados de carga (36 ensayos en total), en función de los siguientes factores: cilindro, combustible, temperatura y sensor bujía.

Tabla 1: Ensayos PROPANO

CILINDRO	COMBUSTIBLE	TEMPERATURA	SIN/CON SENSOR BUJÍA	CARGA
1	PROPANO 80	BAJA	SB/CB	0%SC, 0%CC, 10%, 25%, 50%, 75%, 100%, 110%
		ALTA	CB	0%SC, 0%CC, 10%, 25%, 50%, 75%, 100%,
1	PROPANO 100	BAJA	SB/CB	0%CC, 10%, 25%, 50%, 75%, 100%, 105%, 110%
2	PROPANO 100	BAJA	CB	0%SC, 0%CC, 10%, 25%, 50%, 75%, 100%, 110%
3	PROPANO 100	BAJA	CB	0%SC, 0%CC, 10%, 25%, 50%

Estos ensayos permitieron el ajuste de la infraestructura y el análisis de la influencia de algunos parámetros. El resumen de los resultados se recoge en el Anexo 4 y tras su análisis se establece como ensayo de referencia el recogido en el Anexo 5 Entregable 3.1_ENSAYO DE COMBUSTIBLE DE REFERENCIA PROPANO.

Posteriormente, se desarrollaron los ensayos con combustibles líquidos empleando como combustible de referencia el EN 590 recogido en el Anexo 5. Entregable 3.1_ENSAYO DE COMBUSTIBLE DE REFERENCIA EN 590

Una vez que se realizaron los ensayos, se recopilaron todos los datos monitorizados en una serie de tablas. Estos datos se trataron para detectar errores de lectura y también para realizar los cálculos necesarios para obtener resultados como, por ejemplo, las emisiones de gases en g/KWh.

A partir de estos resultados obtenidos se representaron gráficamente los parámetros más significativos.

5.4.1. Tablas de resultados

- **Ensayo de combustible de referencia: PROPANO**

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 2: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	0,00	1,27	3,01	5,71	8,40	11,03
Consumo	lN/min	16,90	20,00	25,10	34,10	43,40	53,54
Tª ambiente	ºC	32,33	32,97	32,60	32,34	32,55	34,46
Tª colector de admisión	ºC	39,24	41,65	38,41	38,56	38,77	43,63
Tª aire despues compresor	ºC	34,34	34,22	34,16	0,00	34,29	35,20
Tª escape colector	ºC	531,28	564,07	556,76	572,00	589,69	589,69
Tª escape cil.1	ºC	539,00	549,78	542,02	546,00	553,00	553,00
Tª escape cil.2	ºC	528,68	522,87	527,80	539,00	541,00	541,00
Tª escape cil.3	ºC	571,35	573,82	563,39	557,00	550,00	550,00

A continuación, se muestra una recopilación de todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

Tabla 3: Emisiones de gases en % y ppm.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	3,40	3,66	4,03	4,39	4,44	4,22
ppm CO	ppm	915,42	814,37	809,74	672,59	508,05	493,26
ppm NO	ppm	45,96	54,94	137,22	504,28	1003,86	2178,32
ppm NO2	ppm	11,31	17,06	26,29	32,17	34,40	41,90
CO2	%	12,17	11,99	11,73	11,48	11,45	11,60
Nox	ppm	57,27	72,00	163,51	536,44	1038,26	2220,22

Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/KWh, se realizaron una serie de cálculos para obtener la siguiente tabla.

Tabla 4: Emisión de gases en g/KWh

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/KWh	-	1,66	2,07	5,01	8,90	16,64
bs CO	g/KWh	-	9,02	4,85	2,96	1,95	1,75
bs CO2	g/KWh	-	1890,32	998,92	716,45	620,06	582,24

- **Ensayo de combustible de referencia: EN 590**

Los ensayos se realizaron en julio de 2017, en un motor de combustión diésel de 3 cilindros de aplicación a grupos electrógenos de 15 Kva.

Tabla 5: Programa de ensayos en motor diésel.

Ensayo	Muestra de combustible	Fecha	Porcentaje de carga ref. a nominal y velocidad de giro del motor
1	EN-590 ¹³	12/07/2017	10%-25%-50%-75%-100% @ 1500 rpm

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 6: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	-	1,90	3,54	6,84	10,03	13,36
Consumo	g/kWh	-	465,20	315,46	243,94	220,71	214,17
Tª ambiente	°C	-	23,63	23,35	24,31	23,93	23,62
Tª colector de admisión	°C	-	31,65	32,07	33,34	34,72	34,35
Tª aire despues compresor	°C	-	24,74	24,59	24,24	23,16	21,72
Tª escape colector	°C	-	156,16	188,57	266,34	362,27	464,64
Tª escape cil.1	°C	-	161,87	194,61	272,27	358,61	459,09
Tª escape cil.2	°C	-	160,07	192,43	265,10	351,51	451,26
Tª escape cil.3	°C	-	160,21	190,14	255,67	325,93	406,59

A continuación, se muestran todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

¹³ Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, por el que se determinan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes.

Tabla 7: Emisiones de gases en % y ppm

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	-	17,40	16,46	14,36	11,92	8,87
ppm CO	ppm	-	323,41	332,73	281,10	204,87	192,99
ppm NO	ppm	-	132,46	171,79	282,98	421,32	544,50
ppm HC	ppm	-	207,87	201,34	193,98	164,38	183,02
CO2	%	-	2,41	3,04	4,62	6,45	8,76
Nox	ppm	-	183,36	236,40	347,73	474,47	597,78

Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/kWh, se realizaron una serie de cálculos para obtener la siguiente tabla.

Tabla 8: Emisiones de gases en g/kWh

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/kWh	-	11,11	7,48	5,62	5,05	4,65
bs CO	g/kWh	-	12,41	6,85	2,97	1,41	0,95
bs HC1	g/kWh	-	4,05	2,12	1,06	0,59	0,49
bs CO2	g/kWh	-	1452,43	983,99	766,11	697,01	679,99

5.4.2. Comparativa de emisiones: EN 590 frente al PROPANO

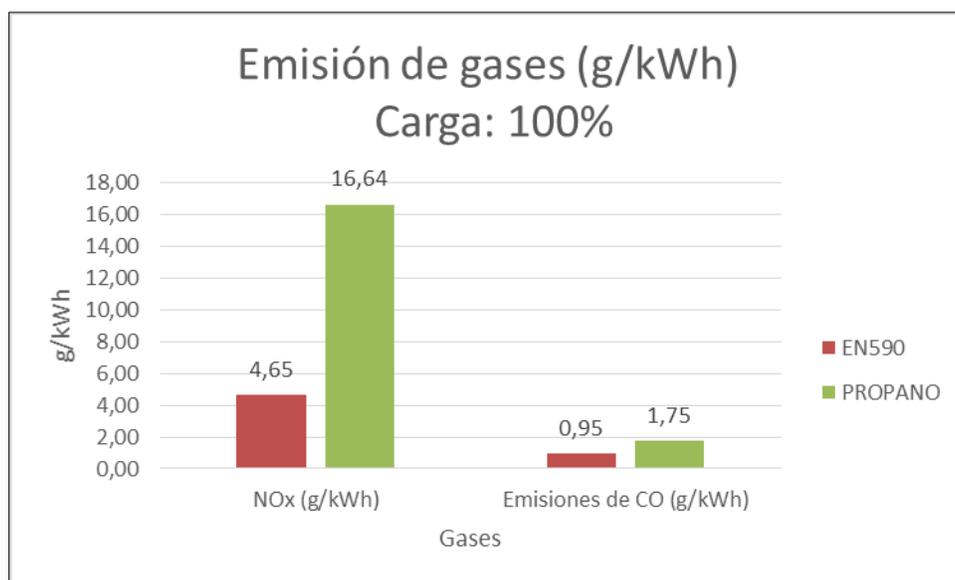


Ilustración 21: Emisión de gases del EN590 frente al PROPANO

De la gráfica anterior cabe destacar la diferencia tan amplia que existe entre la emisión de NOx del ensayo con PROPANO respecto de la emisión de este gas en el caso del ensayo con EN 590, ya que casi se cuadruplica.

5.4.3. Registro de datos presión cilindro

A continuación, se muestran los gráficos P (theta) de ciclo medio y los diagramas indicadores de ciclo medio P(V), obtenidos a partir de la aplicación de presión cilindro, al 100% de la carga, para el caso del EN 590 y del PROPANO.

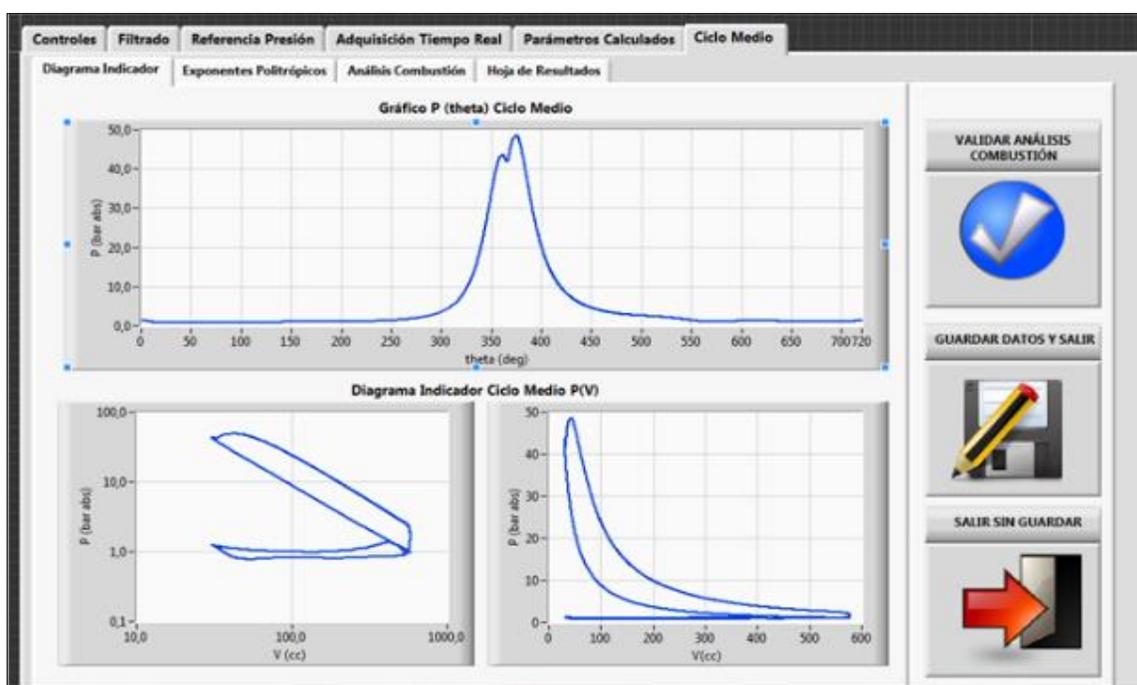


Ilustración 22: Gráficos P (theta) de ciclo medio y los diagramas indicadores de ciclo medio P(V) del EN 590

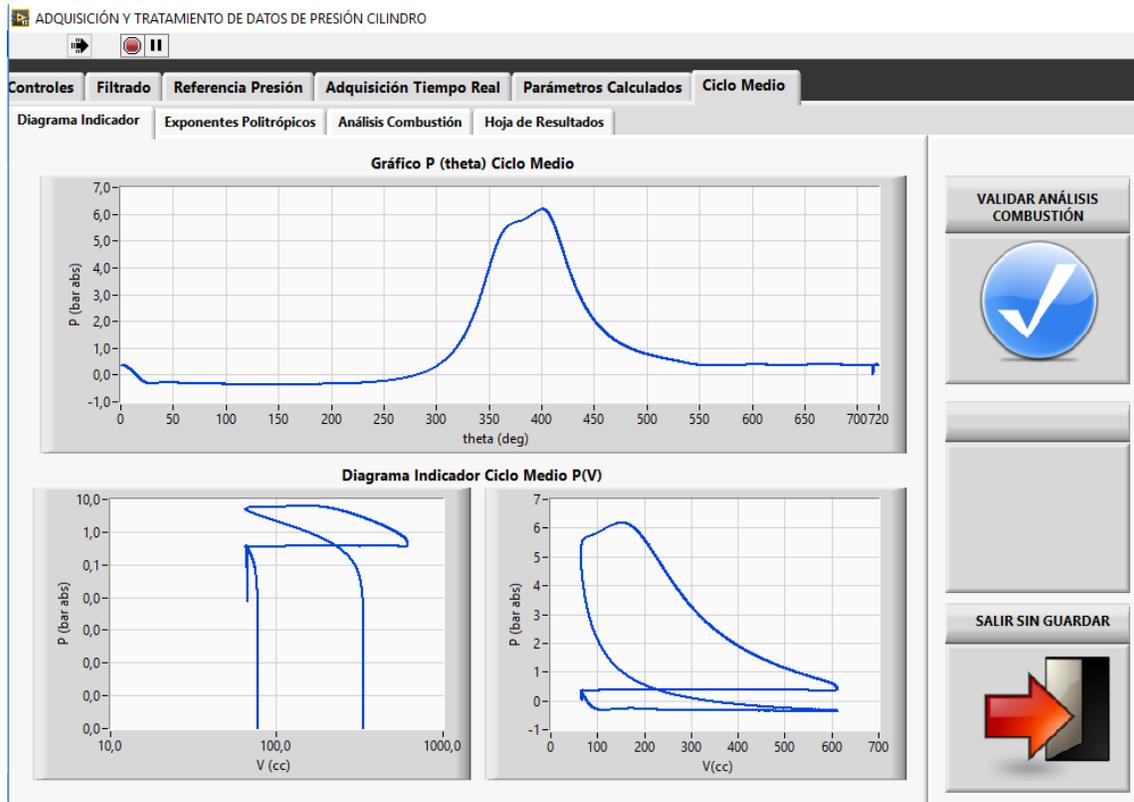


Ilustración 23: Gráficos P (theta) de ciclo medio y los diagramas indicadores de ciclo medio P(V) del PROPANO

5.5. Paquete de trabajo 4. Desarrollo del programa de ensayos. Análisis de resultados

En el último periodo del año se realizaron los ensayos con una muestra de combustible obtenido mediante pirólisis de residuos plásticos.

Para evitar diversos daños en el motor, se decidió no introducir el combustible procedente de residuos plásticos al 100% de su composición, sino mezclado con EN 590, y posteriormente, ir aumentando el contenido del mismo en función de los resultados monitorizados. En la siguiente tabla se recopilan todas las mezclas realizadas, para realizarlas solamente se utilizó el que se denomina como PI100B.

Tabla 9: Mezclas de combustible procedente del proceso de pirolisis y gasóleo

Denominación Muestra de Combustible	Porcentaje de mezcla de combustible	Volumen
EN-590(PIB)	100% V/V EN-590	20 litros
PI20B	20% V/V PIB + 80% V/V EN-590	5 litros
PI40B	40% V/V PIB + 60% V/V EN-590	5 litros
PI60B	60% V/V PIB + 40% V/V EN-590	5 litros
PI80B	80% V/V PIB + 20% V/V EN-590	5 litros
PI100B	100% V/V PIB	4 litros

Los resultados obtenidos se recogen en el Anexo 6. Entregable 4.1_ENSAYOS DE COMBUSTIBLE OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS, no obstante, a continuación, se hace un resumen del mismo. Además, se comenzó con algunos ensayos operando el motor en modo dual operando con SYNGAS y con EN 590.

Una vez que se realizaron los ensayos, se recopilaron todos los datos monitorizados en una serie de tablas. Estos datos se trataron, para detectar errores de lectura y también para realizar los cálculos necesarios para obtener resultados como, por ejemplo, las emisiones de gases en g/kWh.

A partir de estos resultados obtenidos, se representaron gráficamente los parámetros más significativos.

De todos los ensayos realizados con las diferentes mezclas del combustible procedente de la pirolisis de residuos plásticos, para este apartado, se ha decidido resumir únicamente el ensayo realizado con la muestra al 100% en su composición (PI100B), es decir, sin mezclar con EN-590.

Tabla 10: Muestra de combustible PI100B.

Denominación Muestra de Combustible	Porcentaje de mezcla de combustible	Volumen
PI100B	100% V/V PIB	20 litros
Densidad a 15°C	kg/m ³	778.9
Viscosidad	mm ² /s	1.037
Contenido en azufre	mg/kg	17.8
Punto de inflamación	°C	23
Residuo carbonoso (sobre 10%v/v residuo de destilación)	%m/m	0.17
C	%	84.8
	mg	46.6
H	%	14
	mg	7.63
N	%	0.02
	mg	0.011
S	%	0.091
	mg	0.092

5.5.1. Tablas de resultados

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 11: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	-	1,9	3,5	6,9	10,0	11,7
Consumo	g/kWh	-	473,54	315,40	217,18	215,32	210,71
Tª ambiente	°C	-	16,661	16,921	16,740	16,704	16,603
Tª colector de admisión	°C	-	26,458	27,370	26,694	28,885	29,460
Tª aire despues compresor	°C	-	24,163	24,165	23,897	23,894	23,857
Tª escape colector	°C	-	157	194	260	367	430
Tª escape cil.1	°C	-	163	198	273	363	431
Tª escape cil.2	°C	-	159	194	260	360	429
Tª escape cil.3	°C	-	160	193	256	330	388

A continuación, se muestran todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

Tabla 12: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	-	17,82	16,87	14,54	12,26	10,18
ppm CO	ppm	-	739,47	786,99	731,55	507,81	411,78
ppm NO	ppm	-	101,19	145,95	272,09	473,39	581,62
ppm HC	ppm	-	675,47	622,81	469,60	386,25	409,07
CO2	%	-	2,22	2,87	4,36	6,17	7,70
Nox	ppm	-	187,88	250,58	392,13	552,33	652,27

Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/kWh, se realizaron una serie de cálculos para obtener las siguientes tablas.

Tabla 13: Emisiones de gases en g/kWh

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/kWh	-	12,35	8,65	6,18	6,12	5,59
bs CO	g/kWh	-	30,32	16,66	6,99	3,44	2,19
bs HC1	g/kWh	-	14,03	6,71	2,31	1,37	1,15
bs CO2	g/kWh	-	1431,32	955,58	653,83	657,46	643,74

5.5.2. Comparativa de emisiones: EN 590 frente al PI100B

A continuación, se observa una representación gráfica de las emisiones de gases en g/kWh del gasóleo sin aditivos (EN 590), frente al combustible procedente de la pirolisis de residuos plásticos.

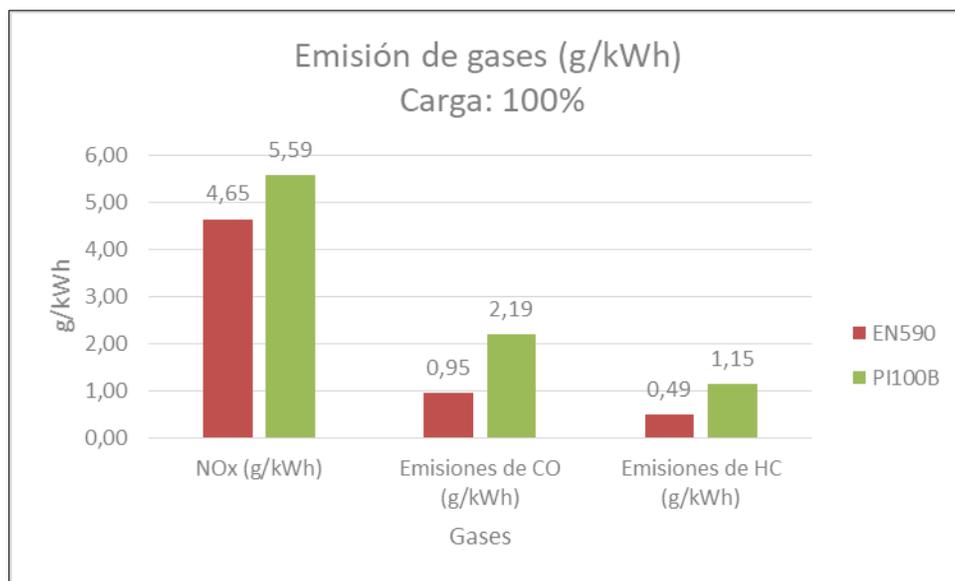


Ilustración 24: Emisión de gases del EN590 frente al PI100B

Tras observar la gráfica anterior, se determina que la emisión de NOx, CO y HC en el caso del PI100B es superior, a pesar de que este se ensayó a una carga máxima inferior que en el caso del EN 590. El hecho de que se ensayase a una carga menor, se debe a que las características de este combustible están limitadas en ese aspecto, y por tanto, no es capaz de soportar una carga mayor sin que el motor se detenga. En caso de realizar el ensayo a la misma carga, la diferencia de emisiones sería mayor.

5.5.3. Registro de datos presión cilindro

A continuación, se muestran los gráficos P (theta) de ciclo medio y los diagramas indicadores de ciclo medio P(V), obtenidos a partir de la aplicación de presión cilindro, al 100% de la carga, para el caso del PI100B.

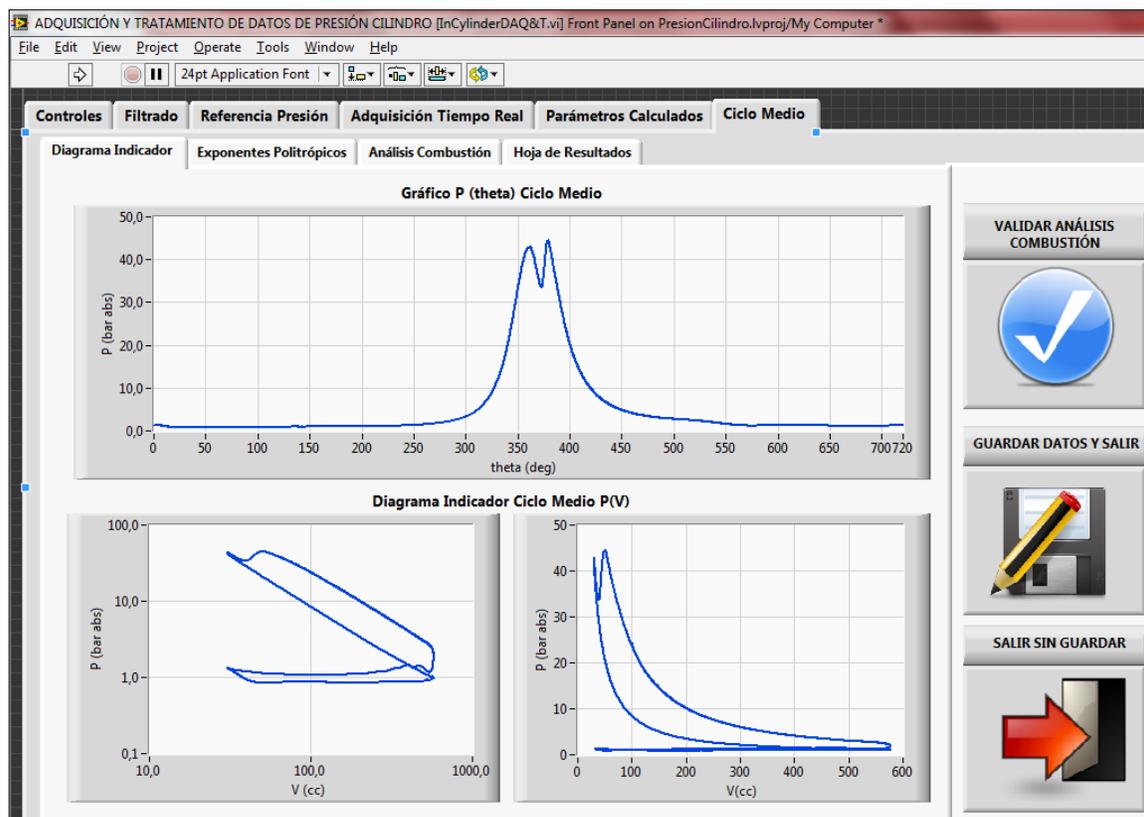
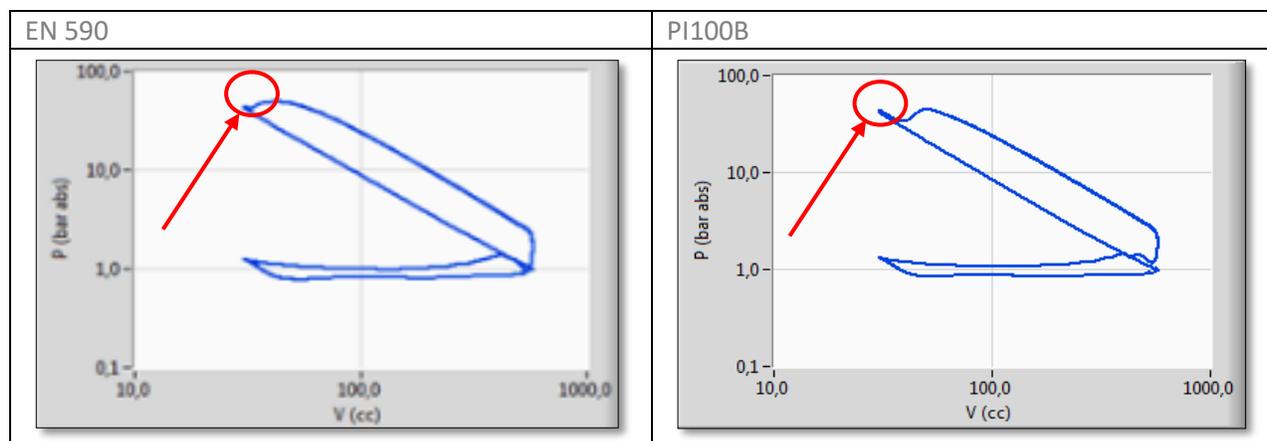


Ilustración 25: Gráficos P (theta) de ciclo medio y los diagramas indicadores de ciclo medio P(V) del PI100B

Si comparamos la gráfica anterior frente a la obtenida con el combustible de referencia EN 590, se concluye que se produce un retraso en la combustión en el caso del ensayo con el combustible PI100B. Este retraso se puede observar en las gráficas P-V que se representan a continuación:

Tabla 14: Comparativa presión cilindro de EN 590 frente a PI100B



En la gráfica de la izquierda se observa, que la combustión se inicia ligeramente después de que el pistón llegue al punto muerto superior (PMS), punto de menor volumen de todo el recorrido del pistón. Esto se determina a partir de la presión, ya que cuando se produce la combustión, la presión aumenta notablemente, y ese aumento, se observa casi en el punto muerto superior (PMS). El hecho de que la combustión tenga lugar en esa posición del recorrido del pistón, quiere decir que se está ante un caso de combustión óptima.

En la gráfica de la derecha se observa un importante retraso en la combustión. Si comparamos ambas gráficas, el aumento de la presión en el caso se del combustible pirolítico se produce bastante después que en el caso del EN 590. Se concluye que la combustión no es óptima, aunque podría mejorarse modificando ligeramente el avance de encendido.



Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente
Polígono Industrial Cabezo Beaza
C/ Sofía 6-13
30353 Cartagena (Murcia)

cetenma@cetenma.es
www.cetenma.es

T +34 968 52 03 61
F +34 968 52 01 34



Centro Tecnológico
de la Energía y del
Medio Ambiente

**LABORATORIO DE MOTORES
ANEXO 1: PROCEDIMIENTO DE
ENSAYO
DETERMINACIÓN TDC. ENSAYO DE
MOTOR ARRASTRADO.**

Cartagena, junio 2017



Centro Tecnológico
de la Energía y del
Medio Ambiente

**LABORATORIO DE MOTORES
ANEXO 1: PROCEDIMIENTO DE
ENSAYO
DETERMINACIÓN TDC. ENSAYO DE
MOTOR ARRASTRADO.**

Cartagena, junio 2017

Índice

Índice	2
1 Objeto	3
2 Alcance	3
3 Metodología de ensayo	3
3.1 Equipos y Materiales	3
3.2 Adquisición de señales	4
3.3 Soporte teórico	4
3.4 Procedimiento	5
4 Resultados	6

1 Objeto

En este documento se recoge el procedimiento a seguir para la determinación del Punto Muerto Superior (Top Dead Center, TDC).

2 Alcance

En el estudio de los procesos de combustión en los MCIA la metodología seguida es la de diagnóstico de la combustión basado en la señal de presión de la cámara de combustión y ángulo de giro del cigüeñal. Sincronizar ambas señales resulta vital para que cálculos posteriores como calor liberado o presión media indicada sean correctos. Para ello será necesario determinar el punto muerto superior (TDC) mediante el software apropiado a través del ensayo de motor arrastrado.

3 Metodología de ensayo

En el presente apartado se recogen todas las fases previas y los pasos necesarios para poder realizar de una forma correcta la determinación del TDC.

3.1 Equipos y Materiales

Para la determinación de las dos variables fundamentales, presión en la cámara de combustión y ángulo de giro del cigüeñal, serán necesarios transductores de presión en el interior del cilindro y sensores de referencia angular que permitan obtener indirectamente el volumen de manera precisa. Para el registro de los valores de presión, se usará un sensor tipo piezorresistivo para la admisión, colocado en el colector de admisión, y otro tipo piezoeléctrico para el interior del cilindro, montado sobre bujía. Ambos sensores de presión necesitan ser amplificados para su correcta lectura. Tanto los sensores como sus respectivos amplificadores son de la marca Kistler Instrument A. G. Para el registro del ángulo girado por el cigüeñal se usará un encoder incremental serie GI342 N707113000 de la marca BAUMER IVO.

	PRESIÓN ADMISIÓN	PRESIÓN CILINDRO
SENSOR	KISTLER 4007C	KISTLER 6118B
AMPLIFICADOR	KISTLER 4624A	KISTLER 5018A

3.2 Adquisición de señales

En la adquisición de los datos de los diferentes sensores se van a emplear los controladores CompactRIO de National Instruments embebidos en tiempo real que ofrecen ejecución autónoma y potente para aplicaciones de LabVIEW Real-Time. Los datos se gestionarán a través de una aplicación específicamente creada para ese fin. Esta aplicación permite visualizar los datos, introducir datos adicionales y grabar un número determinado de ciclos a elección del operador.

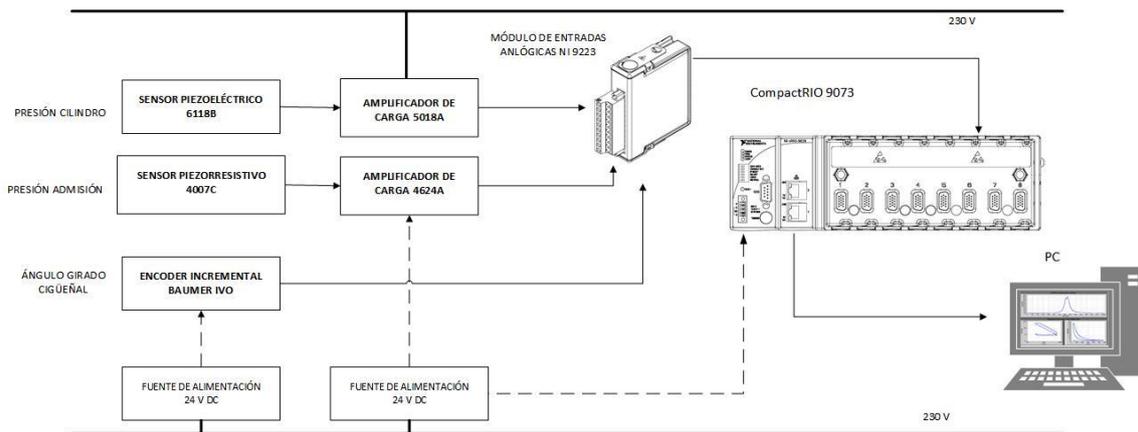


Figura: Cadena de medida Presión- Ángulo girado cigüeñal.

3.3 Soporte teórico

La determinación del TDC mediante el ensayo de motor arrastrado consiste en la medición de la presión en un cilindro con el motor girando sin combustión. De la curva de presión se deduce que el máximo alcanzado por la curva de presión, es decir, la presión de pico, ocurre en el TDC. Es decir, el mínimo volumen en el cilindro se da cuando la presión es máxima.

En los procesos reales existe cierta transferencia de calor a las paredes y fugas de masa, por lo que el pico de presión en un motor arrastrado precede a la posición real del TDC en un ángulo determinado que depende de diversos factores como la velocidad del motor o temperatura. Este desfase entre pico de presión y TDC real es conocido como ángulo de pérdida termodinámico (TLA, Thermodynamic Loss Angle). El TLA aumenta a velocidades bajas del motor, ya que al incrementarse el tiempo del ciclo termodinámico, existe también mayor tiempo para pérdidas de calor y presión.

El método más extendido para el cálculo del TLA es el método de la bisección, que interpola los datos de presión con motor arrastrado en un rango de 15°CA y 3°CA en referencia al pico de presión, antes y después del TDC, para determinar el ángulo del

cigüeñal al que correspondería cada valor de presión de la rama de compresión en la curva de expansión. Para cada par de valores se calcula su valor medio, siendo la posición real del TDC el valor medio de todos los ángulos calculados.

3.4 Procedimiento

Procedimiento de arranque:

1. Comprobar el nivel de aceite y combustible. Añadir aceite y/o combustible si es necesario.
2. Verificar la carga de la batería del banco de ensayos y ponerla a cargar si fuera necesario.
3. Encender el ordenador y los amplificadores de los sensores. Iniciar los programas de software asociados a la instrumentación que vamos a usar:
 - Aplicación para reiniciar el amplificador del sensor de presión en la cámara de combustión.
 - Programa Presión Cilindro de LabVIEW.
5. Abrir ventilación, poner en marcha el extractor de humos de la sala y el extractor de los gases de escape.
6. Controlar la temperatura de las distintas partes del motor y ver que está en los valores adecuados.
7. Abrir la válvula selectora del depósito de combustible a emplear.
8. Activar el sistema de encendido llevando el interruptor de llave a la posición de ON.
9. Cuando la temperatura de los gases de escape alcanza los valores de trabajo estamos en condiciones de iniciar los ensayos del motor.

Procedimiento de ensayo

1. Determinar la máxima potencia (criterio: las oscilaciones de frecuencia bajan por debajo de 49,5Hz).
2. En modo ralentí, lanzar aplicación Presión Cilindro e ir introduciendo y revisando los parámetros de cada ventana:
 - Parámetros de adquisición:
 - Dientes volante de inercia: 360
 - Disparo nivel presión cilindro (V): 5
 - Disparo flanco sensor TDC (V):8
 - Frecuencia de corte (Hz): 3000

3. Una vez se ha fijado la frecuencia de corte, pasar a la siguiente pestaña de Desfase de TDC. En esta ventana definir:
 - Resolución mínima (deg): 0,09
 - Resolución deseada (deg): 0,25
 - Ciclos a promediar: 100
8. Antes de pulsar “Capturar señales” reiniciar el amplificador del sensor de presión en el cilindro. Esto es importante porque si no lo reiniciamos el amplificador deriva y los valores de presión en el cilindro que arroja serán incorrectos. Cuando finaliza la adquisición de datos en LabVIEW, guardamos los datos de presión y del encoder en excel, y las capturas de pantalla correspondientes.

En estas condiciones pueden iniciarse los ensayos con combustión y aumento gradual de la carga.

4 Resultados

Al terminar la adquisición de los ciclos indicados, se representa el ciclo medio, y en la gráfica de determinación de TDC se puede definir la ventana en la que se implementará el método de la bisectriz para el cálculo del ángulo de pérdida termodinámico. El resultado final para el TDC ofrecido por la aplicación es la suma del TLA más el desfase entre la presión máxima y 360° .

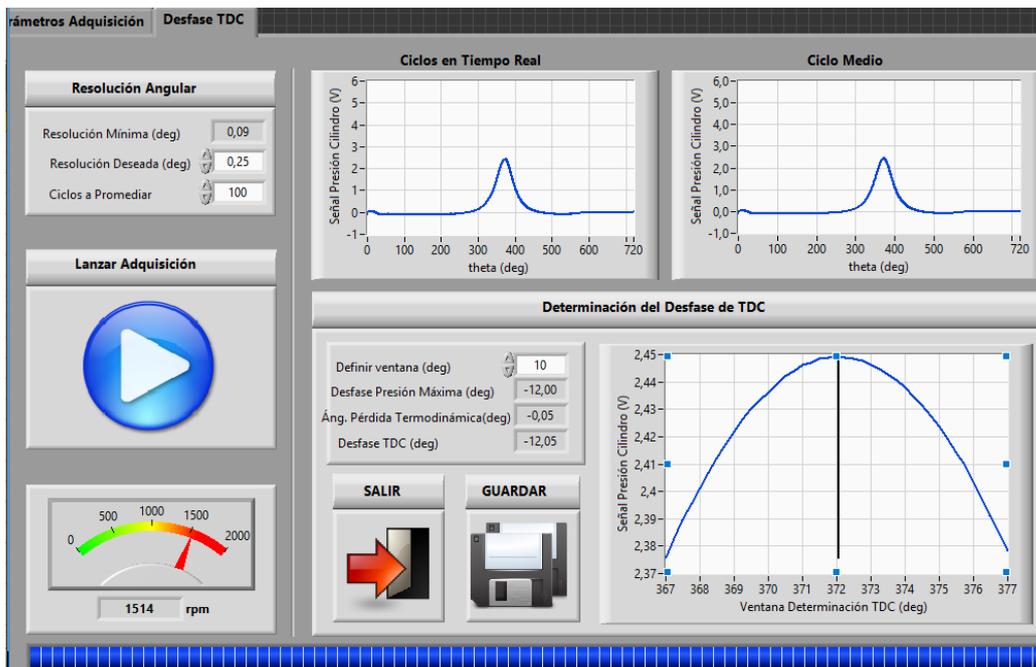


Figura: Ventana de determinación de TDC.



Centro Tecnológico
de la Energía y del
Medio Ambiente

**LABORATORIO DE MOTORES
ANEXO 2: PROCEDIMIENTO DE
ENSAYO
PARA MEDIDA DE KNOCKING**

Cartagena, junio 2017



Centro Tecnológico
de la Energía y del
Medio Ambiente

**LABORATORIO DE MOTORES
ANEXO 2: PROCEDIMIENTO DE
ENSAYO
PARA MEDIDA DE KNOCKING**

Cartagena, junio 2017

Índice

Índice	2
1 Objeto	3
2 Alcance	3
3 Metodología de ensayo	3
3.1 Equipos y Materiales	3
3.2 Adquisición de señales	4
3.3 Soporte teórico	4
3.4 Procedimiento de cálculo	5
3.5 Procedimiento de ensayo	7
4 Resultados	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>

1 Objeto

Este método trata de caracterizar numéricamente la intensidad de la combustión detonante a partir de la presión en el cilindro en función del ángulo girado por el cigüeñal, y para diferentes cargas, a través de un índice llamado Knock Number (KN).

2 Alcance

En el estudio de los procesos de combustión anormal de los MCIAs una de las anomalías que podemos encontrar es el fenómeno de Knocking o combustión detonante. En este documento se redacta un método para su identificación y determinación a partir de la señal de presión en el interior del cilindro en función del ángulo girado por el cigüeñal. Dicho método se encuentra recogido en la norma ASTM D6424-04a(2014): Octane Rating Naturally Aspirated Spark Ignition Aircraft Engines.

3 Metodología de ensayo

En el presente apartado se recogen todas las fases previas y los pasos necesarios para poder realizar el estudio del fenómeno de knocking sobre un MCIAs.

3.1 Equipos y Materiales

Para la determinación de las dos variables fundamentales, presión en la cámara de combustión y ángulo de giro del cigüeñal, serán necesarios transductores de presión en el interior del cilindro y sensores de referencia angular que permitan obtener indirectamente el volumen de manera precisa. Para el registro de los valores de presión, se usará un sensor tipo piezorresistivo para la admisión, colocado en el colector de admisión, y otro tipo piezoeléctrico para el interior del cilindro, montado sobre bujía. Ambos sensores de presión necesitan ser amplificados para su correcta lectura. Tanto los sensores como sus respectivos amplificadores son de la marca Kistler Instrument A. G. Para el registro del ángulo girado por el cigüeñal se usará un encoder incremental serie GI342 N707113000 de la marca BAUMER IVO.

	PRESIÓN ADMISIÓN	PRESIÓN CILINDRO
SENSOR	KISTLER 4007C	KISTLER 6118B
AMPLIFICADOR	KISTLER 4624A	KISTLER 5018A

La potencia generada se disipa en forma de calor en distintas resistencias eléctricas.

3.2 Adquisición de señales

En la adquisición de los datos de los diferentes sensores se van a emplear los controladores CompactRIO de National Instruments embebidos en tiempo real que ofrecen ejecución autónoma y potente para aplicaciones de LabVIEW Real-Time. Los datos se gestionarán a través de una aplicación específicamente creada para ese fin. Esta aplicación permite visualizar los datos, introducir datos adicionales y grabar un número determinado de ciclos a elección del operador.

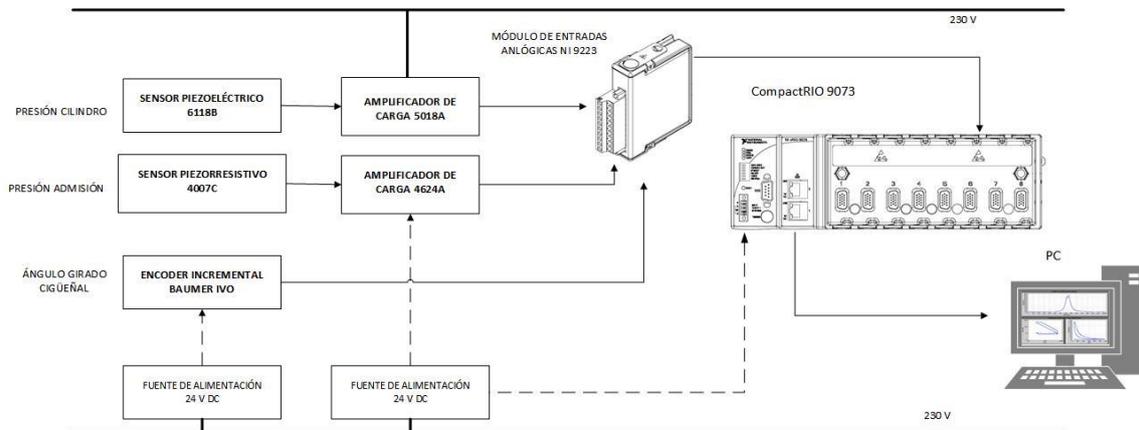
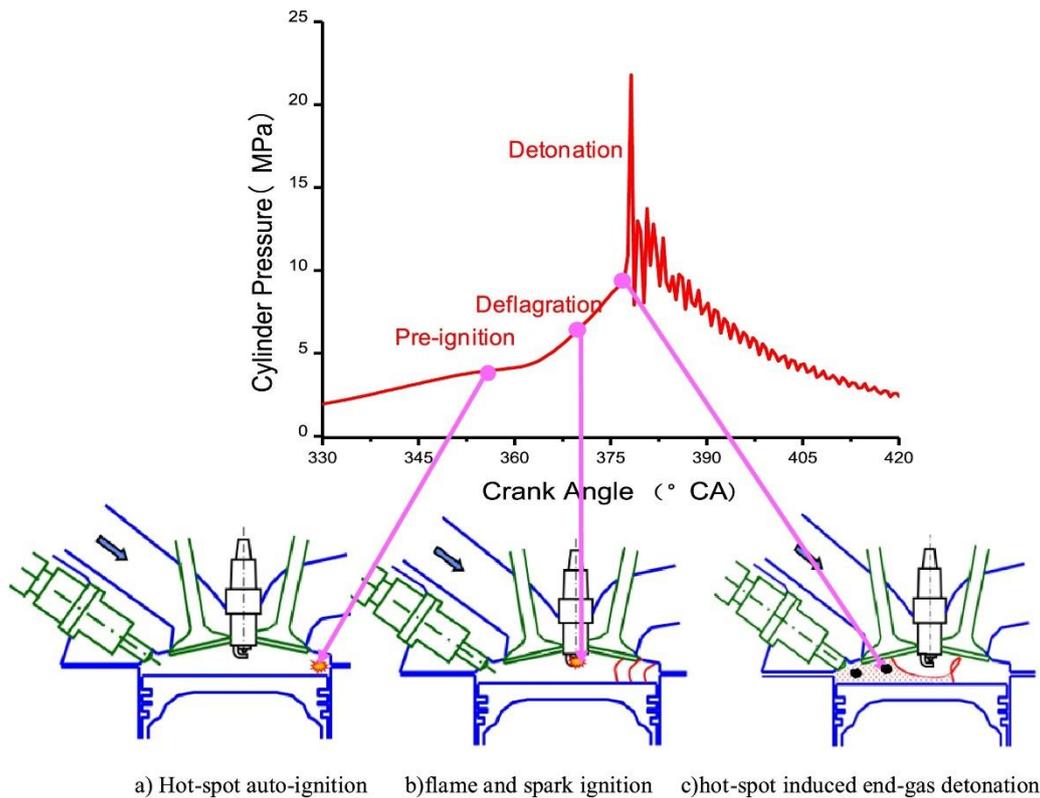


Figura: Cadena de medida Presión- Ángulo girado cigüeñal.

3.3 Soporte teórico

A diferencia de la combustión normal, que comienza en el instante en que salta la chispa y avanza gradualmente hasta alcanzar las demás zonas de la cámara, en la combustión anormal, una vez saltada la chispa, avanza de manera irregular o bien no es provocada directamente por la chispa, sino que obedece a otras causas.

En los procesos de combustión anormal, los dos fenómenos más relevantes son la autoinflamación o autoencendido y el encendido superficial. Si son severos pueden ocasionar daños en el motor, como grandes averías en la culata o en el pistón, y pasan a denominarse combustión detonante o detonación.



El fenómeno de la detonación es una limitante en cuanto a la máxima relación de compresión que puede utilizarse en los diseños de los motores de combustión interna de cuatro tiempos de encendido por chispa. (Fuente: An Introduction to Engine Testing and Development, Richard D. Atkins, 2009).

3.4 Procedimiento de cálculo

El procedimiento para estudiar la detonación se basa en comparar las variaciones en valor absoluto de la presión relativa en las carreras de expansión y compresión. Para cuantificar la detonación en la combustión usamos el parámetro Knock Number (KN), que se define como la diferencia entre los incrementos de presión después y antes del punto muerto superior. Estos incrementos de presión se refieren a puntos consecutivos.

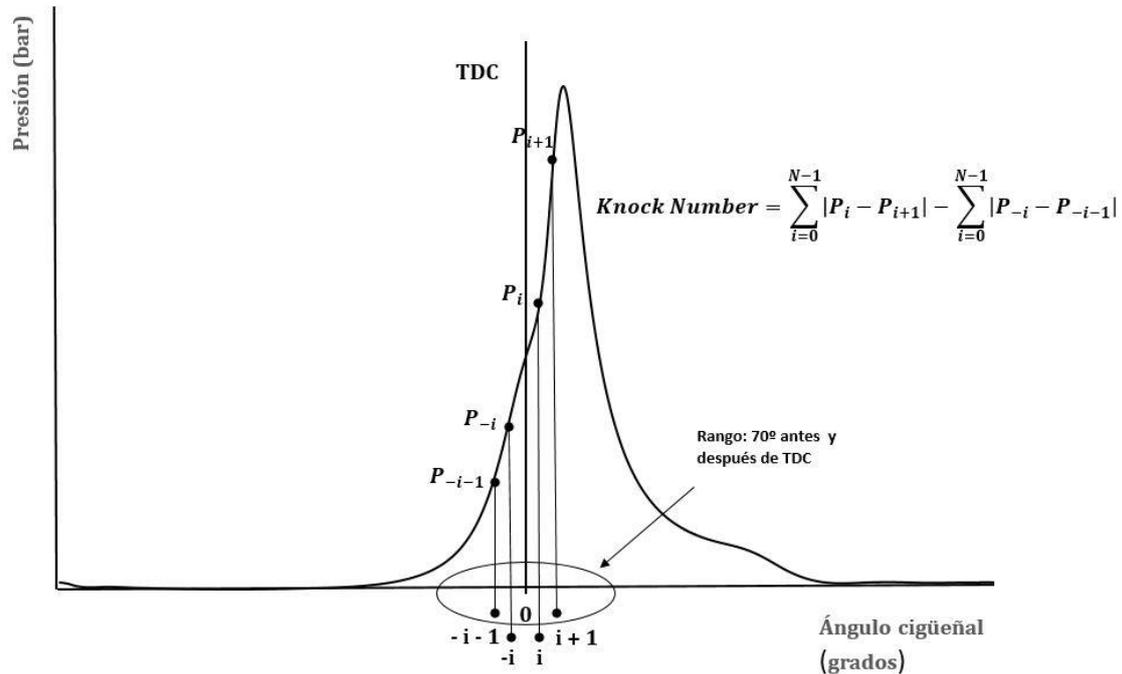


Figura: Método seguido para el estudio del fenómeno de knocking recogido por la norma ASTM D6424.

$$Knock\ Number = \sum_{i=0}^{N-1} |P_i - P_{i+1}| - \sum_{i=0}^{N-1} |P_{-i} - P_{-i-1}|$$

P_0 = Presión en el punto que separa las carreras de expansión y compresión (TDC)

P_{-1} = Presión en un punto antes de P_0 , en la compresión

P_{+1} = Presión en un punto después de P_0 , en la expansión

N = Número de punto antes o después de P_0

Es importante que se tome un rango amplio de puntos pero sin llegar a incluir puntos de las carreras de admisión o escape. En general, un rango de 70° de rotación del cigüeñal es suficiente.

La caracterización de los ciclos vendrá dada por el valor del knock number. Un ciclo con combustión normal tendrá un knock number negativo. Mientras que ciclos con combustión anormal darán como resultado valores mayores que 10, pudiendo llegar a varios cientos.

3.5 Procedimiento de ensayo

Procedimiento de arranque:

1. Comprobar el nivel de aceite y combustible. Añadir aceite y/o combustible si es necesario.
2. Verificar la carga de la batería del banco de ensayos y ponerla a cargar si fuera necesario.
3. Encender el ordenador y los amplificadores de los sensores. Iniciar los programas de software asociados a la instrumentación que vamos a usar:
 - Aplicación para reiniciar el amplificador del sensor de presión en la cámara de combustión.
 - Programa Presión Cilindro de LabVIEW.
5. Abrir ventilación, poner en marcha el extractor de humos de la sala y el extractor de los gases de escape.
6. Controlar la temperatura de las distintas partes del motor y ver que está en los valores adecuados.
7. Abrir la válvula selectora del depósito de combustible a emplear.
8. Activar el sistema de encendido llevando el interruptor de llave a la posición de ON.
9. Cuando la temperatura de los gases de escape alcanza los valores de trabajo estamos en condiciones de iniciar los ensayos del motor.

Procedimiento de ensayo

Para la realización de un ensayo se requiere que toda la instrumentación esté convenientemente calibrada y en perfecto funcionamiento. Por tanto antes del ensayo debe verificarse que, al menos en posición de reposo la medida de todos los instrumentos esté dentro de un rango coherente. El procedimiento seguido para cada grado de carga es el siguiente:

1. Determinar la máxima potencia (criterio: las oscilaciones de frecuencia bajan por debajo de 49,5Hz).
2. En modo ralentí, determinación TDC (Ver procedimiento).
3. En función de la potencia máxima medida, se introduce la carga correspondiente al ensayo mediante el accionamiento de las resistencias y se espera unos minutos a que la temperatura de los gases de escape se estabilice.
6. Lanzar aplicación Presión Cilindro:

7. Anotamos las medidas de temperaturas, presión atmosférica, humedad, potencia y frecuencia. Para proceder al registro de datos, las medidas deben estar completamente estabilizadas. Como las temperaturas son los parámetros que necesitan más tiempo para evolucionar, serán las que determinen el tiempo de espera necesario antes de la toma de datos.
8. Antes de pulsar “Capturar señales” reiniciar el amplificador del sensor de presión en el cilindro. Esto es importante porque si no lo reiniciamos el amplificador deriva y los valores de presión en el cilindro que arroja serán incorrectos. Cuando finaliza la adquisición de datos en LabVIEW, guardamos los datos de presión y del encoder en excel, y las capturas de pantalla correspondientes.
10. Introducimos la carga siguiente y volvemos al punto 3.

Debido a la utilización de diversos sistemas independientes de adquisición de datos se hace necesario un procedimiento de sincronización de las medidas registradas. No obstante, los posibles errores en la sincronización o en los periodos de muestreo no tendrán mayor importancia cuando todas las variables de medida se hayan estabilizado.



Centro Tecnológico
de la Energía y del
Medio Ambiente

**LABORATORIO DE MOTORES
ANEXO 3: PROCEDIMIENTO DE
ENSAYO
PARA MEDIDA DE MISFIRE**

Cartagena, junio 2017



Centro Tecnológico
de la Energía y del
Medio Ambiente

**LABORATORIO DE MOTORES
ANEXO 3: PROCEDIMIENTO DE
ENSAYO
PARA MEDIDA DE MISFIRE**

Cartagena, junio 2017

Índice

Índice	2
1 Objeto	3
2 Alcance	3
3 Metodología de ensayo	3
3.1 Equipos y Materiales	3
3.2 Adquisición de señales	4
3.3 Soporte teórico	4
3.4 Procedimiento de cálculo	5
3.5 Procedimiento de ensayo	6
4 Resultados	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>

1 Objeto

Este método trata de caracterizar la presencia de apagados de llama a partir de la presión en el cilindro en función del ángulo girado por el cigüeñal, y para diferentes cargas, a través de un índice llamado Knock Number (KN).

2 Alcance

En el estudio de los procesos de combustión anormal de los MCIA una de las anomalías que podemos encontrar es el fenómeno de Misfire o apagado de llama. En este documento se redacta un método para su detección a partir de la señal de presión en el interior del cilindro en función del ángulo girado por el cigüeñal.

2.1 Metodología de ensayo

En el presente apartado se recogen todas las fases previas y los pasos necesarios para poder realizar el estudio del fenómeno de Misfire sobre un MCIA.

2.2 Equipos y Materiales

Para la determinación de las dos variables fundamentales, presión en la cámara de combustión y ángulo de giro del cigüeñal, serán necesarios transductores de presión en el interior del cilindro y sensores de referencia angular que permitan obtener indirectamente el volumen de manera precisa. Para el registro de los valores de presión, se usará un sensor tipo piezorresistivo para la admisión, colocado en el colector de admisión, y otro tipo piezoeléctrico para el interior del cilindro, montado sobre bujía. Ambos sensores de presión necesitan ser amplificados para su correcta lectura. Tanto los sensores como sus respectivos amplificadores son de la marca Kistler Instrument A. G. Para el registro del ángulo girado por el cigüeñal se usará un encoder incremental serie GI342 N707113000 de la marca BAUMER IVO.

	PRESIÓN ADMISIÓN	PRESIÓN CILINDRO
SENSOR	KISTLER 4007C	KISTLER 6118B
AMPLIFICADOR	KISTLER 4624A	KISTLER 5018A

La potencia generada se disipa en forma de calor en distintas resistencias eléctricas.

2.3 Adquisición de señales

En la adquisición de los datos de los diferentes sensores se van a emplear los controladores CompactRIO de National Instruments embebidos en tiempo real que ofrecen ejecución autónoma y potente para aplicaciones de LabVIEW Real-Time. Los datos se gestionarán a través de una aplicación específicamente creada para ese fin. Esta aplicación permite visualizar los datos, introducir datos adicionales y grabar un número determinado de ciclos a elección del operador.

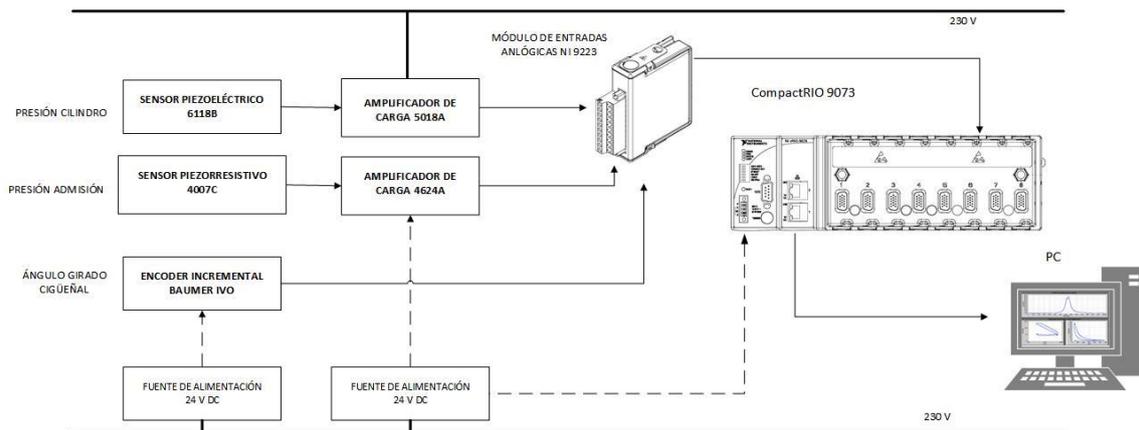


Figura: Cadena de medida Presión- Ángulo girado cigüeñal.

2.4 Soporte teórico

A diferencia de la combustión normal, que comienza en el instante en que salta la chispa y avanza gradualmente hasta alcanzar las demás zonas de la cámara, en la combustión anormal, una vez saltada la chispa, avanza de manera irregular o bien no es provocada directamente por la chispa, sino que obedece a otras causas.

En los procesos de combustión anormal, los dos fenómenos más relevantes son la autoinflamación o autoencendido y el encendido superficial. Si son severos pueden ocasionar daños en el motor, como grandes averías en la culata o en el pistón, y pasan a denominarse combustión detonante o detonación.

RELACIÓN ENTRE IMERP Y MISFIRE

DIAGRAMAS PRESIÓN VOLUMEN EN CICLOS CON MISFIRE

2.5 Procedimiento de cálculo

En primer lugar, para identificar los ciclos en los que se produce apagado de llama, representamos la presión máxima y buscamos aquellos ciclos en los que no se aprecie combustión, es decir, la presión máxima alcanzada es la de la relación de compresión.

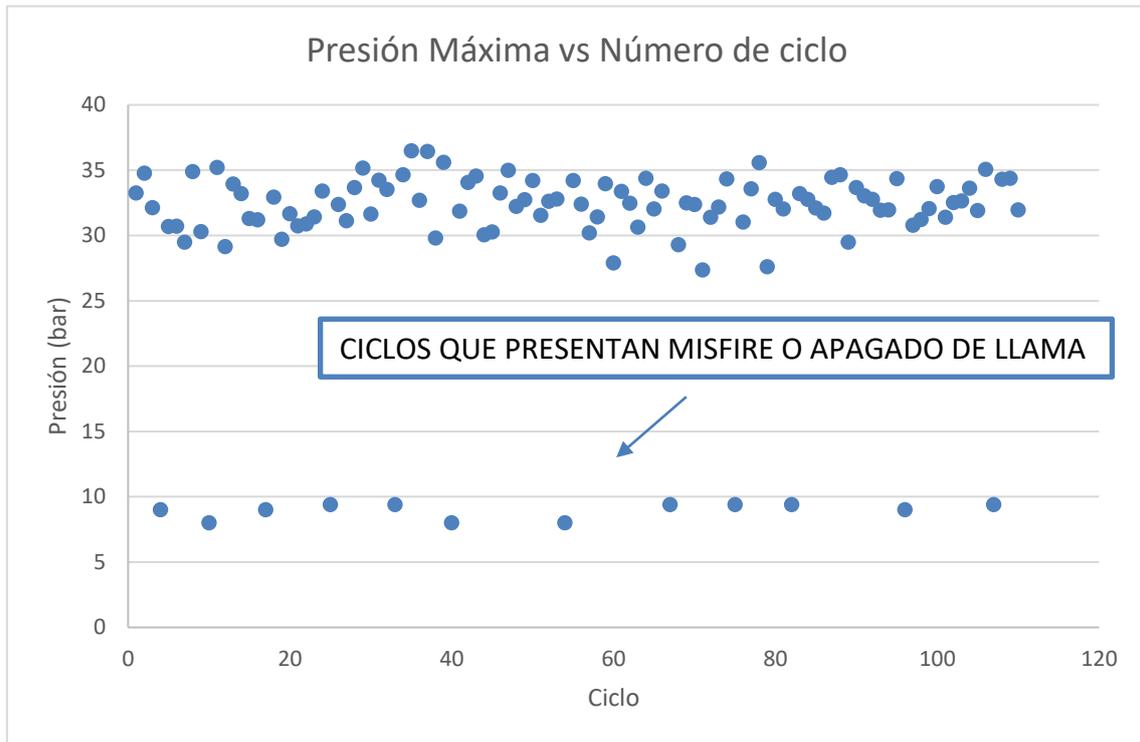
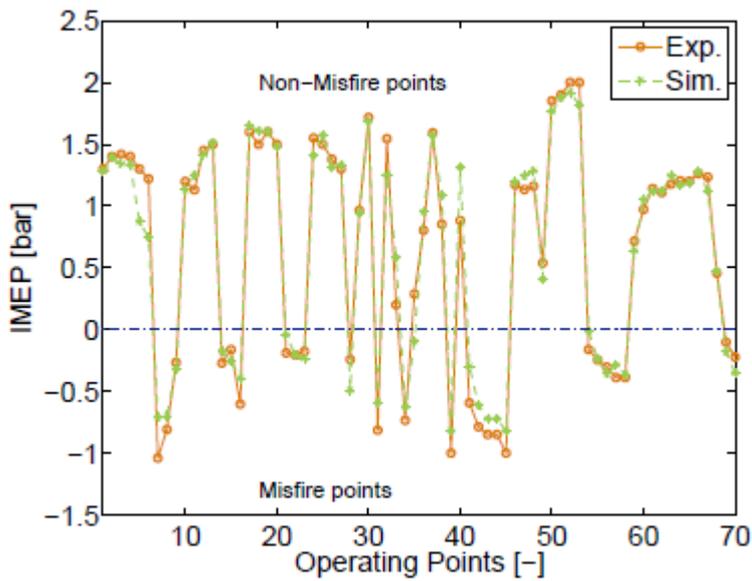


Figura: Método seguido para el estudio del fenómeno de MISFIRE.

The points with IMEP < 0 are misfire which is separated from non-misfire cycle:



Fte: INMURO 28

2.6 Procedimiento de ensayo

Procedimiento de arranque:

1. Comprobar el nivel de aceite y combustible. Añadir aceite y/o combustible si es necesario.
2. Verificar la carga de la batería del banco de ensayos y ponerla a cargar si fuera necesario.
3. Encender el ordenador y los amplificadores de los sensores. Iniciar los programas de software asociados a la instrumentación que vamos a usar:
 - Aplicación para reiniciar el amplificador del sensor de presión en la cámara de combustión.
 - Programa Presión Cilindro de LabVIEW.
5. Abrir ventilación, poner en marcha el extractor de humos de la sala y el extractor de los gases de escape.
6. Controlar la temperatura de las distintas partes del motor y ver que está en los valores adecuados.
7. Abrir la válvula selectora del depósito de combustible a emplear.
8. Activar el sistema de encendido llevando el interruptor de llave a la posición de ON.
9. Cuando la temperatura de los gases de escape alcanza los valores de trabajo estamos en condiciones de iniciar los ensayos del motor.

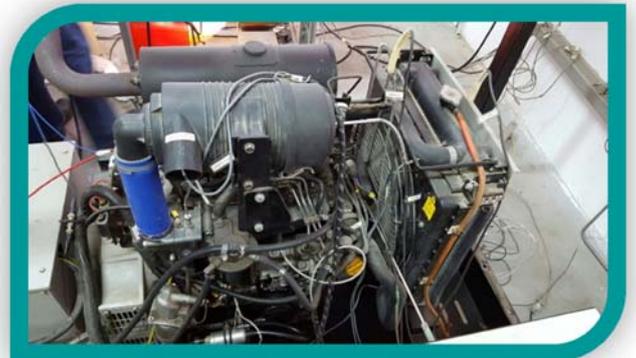
Procedimiento de ensayo

Para la realización de un ensayo se requiere que toda la instrumentación esté convenientemente calibrada y en perfecto funcionamiento. Por tanto antes del ensayo debe verificarse que, al menos en posición de reposo la medida de todos los instrumentos esté dentro de un rango coherente. El procedimiento seguido para cada grado de carga es el siguiente:

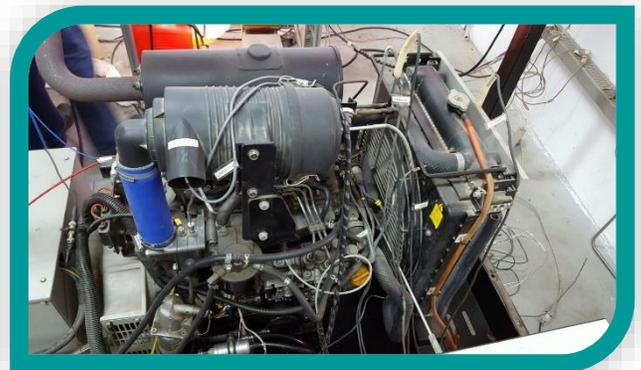
1. Determinar la máxima potencia (criterio: las oscilaciones de frecuencia bajan por debajo de 49,5Hz).
2. En modo ralentí, determinación TDC (Ver procedimiento).
3. En función de la potencia máxima medida, se introduce la carga correspondiente al ensayo mediante el accionamiento de las resistencias y se espera unos minutos a que la temperatura de los gases de escape se estabilice.
6. Lanzar aplicación Presión Cilindro:
7. Anotamos las medidas de temperaturas, presión atmosférica, humedad, potencia y frecuencia. Para proceder al registro de datos, las medidas deben estar completamente estabilizadas. Como las temperaturas son los parámetros que necesitan más tiempo para evolucionar, serán las que determinen el tiempo de espera necesario antes de la toma de datos.
8. Antes de pulsar "Capturar señales" reiniciar el amplificador del sensor de presión en el cilindro. Esto es importante porque si no lo reiniciamos el amplificador deriva y los valores de presión en el cilindro que arroja serán incorrectos. Cuando finaliza la adquisición de datos en LabVIEW, guardamos los datos de presión y del encoder en excel, y las capturas de pantalla correspondientes.
10. Introducimos la carga siguiente y volvemos al punto 3.

Debido a la utilización de diversos sistemas independientes de adquisición de datos se hace necesario un procedimiento de sincronización de las medidas registradas. No obstante, los posibles errores en la sincronización o en los periodos de muestreo no tendrán mayor importancia cuando todas las variables de medida se hayan estabilizado.

ANEXO 4: RESUMEN ENSAYOS PROPANO



ANEXO 4: RESUMEN ENSAYOS PROPANO





ÍNDICE

1. RESUMEN ENSAYOS PROPANO 80	3
2. RESUMEN ENSAYOS PROPANO 100	7

1. RESUMEN ENSAYOS PROPANO 80

PROPANO 80%								
Cilindro 1	CON SENSOR BUJÍA				BAJA TEMPERATURA			
Fecha:	12/07/2017		10/07/2017			12/07/2017		
CARGA	0%CC	0%SC	10%	25%	50%	75%	100%	110%
POTENCIA	0	0	1017	2560	5024	7525	9889	10812
CONSUMO G/S	0,2564 1	0,3623 2	0,2583 9	0,3775 9	0,5115 51	0,8148 1	0,7894	0,8637 9
T AMBIENTE	32431	32,48	32,112	32,27	32,28	32,76	34,239	35,31
TADMISON CAJA MOTOR	36	36,31	37,22	37,63	37,63	39,16	38,49	41,79
TADMISON FILTRO AIRE	32,71	33,11	34,43	34,6	34,6	34,89	33,836	34,439
COLECTOR	561,68	563,43	566,76	561,2	577,86	595,78	605	614
CIL 3	590	525,82	575,65	567,17	560,07	552,09	552	558
CIL2	540	475,36	525,92	529,84	543,14	544,65	546	550
CIL1	560	381,8	550,9	546,18	555,42	560,18	567	571
ANALÍTICA GASES ESCAPE								
% O2	3,75		3,95	4,38	4,77	4,74	4,50	4,15
ppm CO	885,18		885,80	880,04	752,75	532,01	548,82	413,71
ppm NO	28,45		57,85	145,87	486,62	1285,5 3	2065,6 4	3114,0 7
ppm SO2	0,08		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ppm NO2	9,39		17,80	26,04	31,70	34,00	39,65	52,58
[ppm] CxHy	1348,4 6		3117,6 8	3114,6 7	2955,7 7	2734,4 6	1815,9 9	1828,4 2
[ppm] H2	169,48		191,97	167,97	138,57	122,08	104,38	109,07
mg/m3 NOx	80,90		163,54	381,84	1178,0 9	2988,5 0	4707,8 6	6925,3 5
°C AT	507,96		516,68	526,91	547,51	579,80	596,96	605,92
°C VT	34,03		34,43	34,57	34,66	34,62	34,70	35,11
[%] qA	20,60		21,15	22,04	23,38	24,83	25,31	25,27
%CO2	11,26		11,12	10,84	10,59	10,61	10,77	10,99
[lambda] lambda	1,22		1,23	1,26	1,29	1,29	1,27	1,25
[%] REN	78,74		78,18	77,29	76,03	74,76	74,27	74,41
[°C] IT	38,92		37,34	37,51	37,63	37,72	39,26	39,46
[l/min] Bomb	1,02		1,02	1,01	1,03	1,03	1,03	1,04
[°C] TDGS	52,31		52,11	51,70	51,32	51,35	51,59	51,93

PROPANO 80%						
Fecha: 07/07/2017	Cilindro: 1		SIN SENSOR BUJÍA		BAJA TEMPERATURA	
CARGA	0%	10%	25%	50%	75%	100%
POTENCIA	0	1019	2569	5050	7573	9892
CONSUMO G/S	0,23055	0,299	0,38835	0,50445	0,65672	0,77882
T AMBIENTE	26,0	25,0	28,1	27,8	28,0	30,6
TADMISON CAJA MOTOR	31,5	31,8	32,9	33,3	34,3	37,1
TADMISON FILTRO AIRE	36,2	36,0	36,8	37,9	39,2	40,6
TESCAPE (TESTO)	533,0	545,0	548,0	569,0	595,0	610,0
COLECTOR	570,0	542,0	561,0	585,0	600,8	609,0
CIL 3	582,0	576,0	558,0	561,0	558,0	551,0
CIL2	546,0	572,0	526,0	547,0	548,9	548,0
CIL1	570,0	538,0	551,0	561,0	564,3	568,0
% O2	3,71	3,91	4,26	4,61	4,67	4,50
ppm CO	939,23	905,44	878,28	777,65	609,11	445,67
ppm NO	29,72	51,40	128,70	424,36	1031,34	1907,04
ppm SO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ppm NO2	9,12	15,65	23,80	29,39	31,27	38,52
[ppm] CxHy	1933,59	1942,34	2091,68	2091,23	2101,25	2206,42
[ppm] H2	102,33	192,56	159,96	131,62	112,19	110,75
mg/m3 NOx	83,31	144,83	336,04	1021,37	2400,46	4349,35
°C AT	533,60	544,77	548,11	566,82	596,20	605,33
°C VT	29,14	29,47	29,93	30,20	30,44	32,19
[%] qA	21,90	22,57	23,06	24,28	25,66	25,79
%CO2	11,28	11,15	10,92	10,69	10,66	10,77
lambda	1,21	1,23	1,25	1,28	1,29	1,27

[%] REN	77,40	76,75	76,28	75,12	73,86	73,87
[V] Bat.	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,80
[°C] IT	31,10	31,93	32,67	33,03	33,40	34,94
[l/min] Bomb	0,99	1,01	1,00	1,00	1,01	0,99
[°C] TDGS	52,37	52,15	51,80	51,49	51,40	51,57

PROPANO 80%						
Fecha: 13/07/2017	Cilindro 1	CON SENSOR BUJÍA		ALTA TEMPERATURA		
CARGA	0%	10%	25%	50%	75%	100%
POTENCIA	0	1020	2558	5021	7536	9868
CONSUMO G/S	0,254	0,308	0,332	0,490	0,631	0,779
T AMBIENTE	40,2	38,8	39,3	40,3	43,7	45,5
TADMISON CAJA MOTOR	43,4	44,0	44,5	45,8	50,3	51,6
TADMISON FILTRO AIRE	37,2	38,1	39,2	40,3	43,9	44,5
TESCAPE	520,0	520,0	531,0	549,0	574,0	608,0
COLECTOR	563,0	572,0	568,64	557,0	601,0	614,0
CIL 3	581,0	574,0	564,0	559,0	554,0	553,0
CIL2	547,0	535,0	535,0	543,0	550,0	554,0
CIL1	553,0	549,0	545,0	551,0	562,0	570,0
ANALÍTICA GASES ESCAPE						
% O2	3,42	3,65	3,98	4,50	4,43	4,11
ppm CO	2248,01	830,85	832,49	796,17	682,92	569,28
ppm NO	40,18	62,92	173,03	481,16	1187,53	2404,35
ppm NO2	10,24	17,01	26,14	32,11	33,44	39,63
[ppm] CxHy	620,83	722,21	846,41	924,15	1106,56	1168,82
[ppm] H2	199,29	148,99	111,86	88,62	97,43	91,38
mg/m3 NOx	105,84	169,86	431,76	1148,15	2719,02	5340,43
°C AT	512,64	519,39	531,51	549,48	583,53	605,79
°C VT	37,43	38,44	39,19	40,04	43,47	43,97
[%] qA	20,36	20,82	21,61	22,93	24,22	24,83
%CO2	11,47	11,32	11,11	10,76	10,81	11,01
lambda	1,19	1,21	1,23	1,27	1,27	1,24
[%] REN	78,90	78,57	77,75	76,45	75,24	74,74
[°C] IT	38,11	39,17	40,31	41,08	44,85	45,24
[l/min] Bomb	1,03	1,03	1,02	1,02	1,01	1,02
[°C] TDGS	52,61	52,39	52,09	51,57	51,65	51,96

2. RESUMEN ENSAYOS PROPANO 100

PROPANO 100%						
Fecha: 07/07/2017	Cilindro: 1	SIN BUJÍA		BAJA TEMPERATURA		
CARGA	0%	10%	25%	50%	75%	100%
POTENCIA (W)	0	1019	2562	5030	7544	9954
CONSUMO L/min	18	20,66	25,55	34,25	43,8	53,54
T AMBIENTE	29,09	29,31	29,52	29,84	29,94	30,4
TADMISON CAJA MOTOR	31,97	33,62	34,11	34,35	34,79	35,5
TADMISON FILTRO AIRE	37	37,73	38,21	38,79	39	41
TESCAPE	393,5	416	423,9	437	475	511
COLECTOR	571	573,2	560	576	596	609
CIL 3	584,9	527	565	559	552	553
CIL2	539,9	534,1	533	542	546	549
CIL1	575,8	564	549	557	561	569
ANÁLISIS GASES ESCAPE						
% O2	3,63	3,84	4,10	4,31	4,34	4,13
ppm CO	918,58	820,30	830,51	741,68	549,22	301,43
ppm NO	25,17	43,97	109,84	407,23	1020,36	2098,63
ppm SO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ppm NO2	10,39	14,11	21,86	29,29	31,50	38,59
[ppm] CxHy	2401,66	2344,15	2482,42	2480,38	2479,26	2531,28
[ppm] H2	233,45	196,89	186,45	165,13	137,40	129,17
mg/m3 NOx	75,68	124,75	287,54	965,33	2328,19	4674,18
°C AT	517,10	527,29	528,26	545,66	577,07	599,19
°C VT	31,30	31,67	31,92	32,12	32,24	32,43
[%] qA	21,01	21,64	21,93	22,91	24,34	25,08
%CO2	11,33	11,20	11,02	10,89	10,87	11,01
[lambda] lambda	1,21	1,22	1,24	1,26	1,26	1,24
[%] REN	78,32	77,76	77,45	76,52	75,24	74,69
[°C] IT	34,54	34,86	35,03	35,17	35,32	35,46
[l/min] Bomb	0,99	0,98	0,99	1,00	1,00	1,02
[°C] TDGS	52,42	52,21	51,97	51,77	51,75	51,94



PROPANO 100%								
Cilindro 1			CON SENSOR BUJÍA			BAJA TEMPERATURA		
Fecha:	10/07/2017					12/07/2017		
CARGA	0%	10%	25%	50%	75%	100%	105 %	110%
POTENCIA (W)	0	1018	2560	5000	7520	9888	1037 3	1058 1
CONSUMO L/min	16,9	20	25,1	34,1	43,4	-	-	-
T AMBIENTE(°C)	32,33	32,97	32,6	32,34	32,55	34,46	35,4 1	36,62
TADMISON CAJA MOTOR(°C)	41,65	39,24	38,41	38,56	38,77	43,63	44,8 7	48,09
TADMISON FILTRO AIRE (°C)	34,34	34,22	34,16	34,22	34,29	35,2	35,4 9	36,18
T COLECTOR (°C)	531,28	564,07	556,76	572	589,69	611	616	619
T CIL 3(°C)	571,35	573,82	563,39	557	550	555	558	561
T CIL2(°C)	528,68	522,87	527,8	539	541	550	553	554
T CIL1(°C)	539	549,78	542,02	546	553	571	574	573
ANALÍTICA GASES ESCAPE								
% O2	3,67	3,93	4,30	4,66	4,70	4,49	4,32	3,80
ppm CO	936,63	833,42	828,69	688,59	520,52	505,42	409, 25	261,3 9
ppm NO	45,96	54,94	137,22	504,28	1080,3 8	2178,3 2	2722 ,22	sup
ppm NO2	11,31	17,06	26,29	32,17	34,40	41,90	46,4 5	64,01
[ppm] CxHy	2318,67	2356,90	2371,82	2395,16	2281,2 0	-	-	-
[ppm] H2	248,87	217,82	195,75	149,58	131,55	101,89	107, 62	110,8 2
mg/m3 NOx	123,39	155,58	361,28	1211,27	2523,4 1	4962,7 1	6124 ,23	sup
°C AT	484,97	512,55	522,79	542,23	574,00	602,26	609, 98	611,5 4

°C VT	34,42	34,52	34,59	34,52	34,57	35,02	35,37	35,66
[%] qA	19,53	20,96	21,77	23,02	24,52	25,52	25,65	25,10
%CO2	11,30	11,13	10,90	10,66	10,63	10,77	10,88	11,22
lambda	1,21	1,23	1,26	1,28	1,29	1,27	1,26	1,22
[%] REN	79,78	78,42	77,60	76,44	75,07	74,09	74,03	74,70
[°C] IT	37,68	37,83	37,9	37,90	37,95	39,30	39,33	39,46
[l/min] Bomb	1,03	1,03	1,03	1,01	1,03	1,03	1,03	1,03
[°C] TDGS	52,38	52,12	51,79	51,43	51,37	51,60	51,76	52,29

PROPANO 100%							
Fecha: 19/07/2017		Cilindro 2		CB	BAJA TEMPERATURA		
CARGA	0%	10%	25%	50%	75%	100%	110%
POTENCIA (W)	0	1015	2558	5026,6	7541	9893	10800
CONSUMO L/min	17,51	20,58	25,45	34,33	43,78	53,44	57,54
T AMBIENTE	31,95	32,43	32,5	33,12	33,61	34,35	35
TADMISON CAJA MOTOR	37,17	38	38,52	39,47	40,78	43	45
TADMISON FILTRO AIRE	32,32	32,8	33,02	33,34	33,56	33,92	34,26
COLECTOR	555,6	568,4	556,5	574,97	594,48	604,83	611,24
CIL 3	583,8	571	565,78	558	552,18	548,66	553,83
CIL2	526,16	520	523,22	536	542,44	544,89	547,75
CIL1	571,5	561	551,9	558	562,38	568,06	570
ANALÍTICA GASES ESCAPE							
% O2	3,48	3,82	4,27	4,70	4,31	4,31	3,98
ppm CO	1013,52	885,79	872,29	867,44	952,04	956,92	994,91
ppm NO	26,39	45,77	106,18	330,81	1221,68	2092,31	3277,66
ppm SO2	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ppm NO2	12,96	18,10	26,67	33,51	37,08	42,05	54,08
[ppm] CxHy	18,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
[ppm] H2	185,00	136,76	102,91	69,82	46,53	24,63	4,48
mg/m3 NOx	82,97	137,03	293,09	824,59	2782,75	4718,40	7220,20
°C AT	507,86	523,86	530,30	549,89	581,87	600,58	608,19
°C VT	32,72	33,17	33,49	33,78	34,25	34,73	34,89
[%] qA	20,41	21,41	22,12	23,44	24,43	25,24	25,16
%CO2	11,43	11,21	10,91	10,64	10,89	10,89	11,11
[lambda] lambda	1,20	1,22	1,26	1,29	1,26	1,26	1,23
[%] REN	78,85	77,95	77,22	75,87	74,85	74,03	74,06
[°C] IT	35,19	35,85	36,34	36,72	37,09	37,45	37,74
[l/min] Bomb	1,03	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,06
[°C] TDGS	52,58	52,25	51,81	51,40	51,79	51,79	52,08

PROPANO 100%						
Fecha: 19/07/2017	Cilindro 3	CON SENSOR BUJÍA		BAJA TEMPERATURA		
CARGA	0%SC	0%	10%	25%	50%	75%
POTENCIA		0	1019	2561	5021	7458
CONSUMO Ln/min	23,3	17,92	20,58	25,33	35	45,92
T AMBIENTE	32,8	32,49	32,9	33,13	33,5	33,86
TADMISON CAJA MOTOR	39,40	39,87	40,14	40,52	40,86	41,82
TADMISON FILTRO AIRE	34,01	34,04	34,13	34,26	34,4	34,58
COLECTOR	431	485	564	557	569	557
CIL 3	450	451	564	560,6	539	440
CIL2	454	444	444	530	536	522
CIL1	492	492	492	555	556	552
ANÁLISIS DE GASES ESCAPE						
% O2	10,45	4,17	3,82	4,27	4,98	6,25
ppm CO	553,42	906,21	946,54	872,58	816,75	754,08
ppm NO	26,21	20,06	37,50	92,58	405,52	1083,61
ppm SO2	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
ppm NO2	19,55	12,34	18,41	26,63	34,55	39,07
[ppm] CxHy	14820,34	1295,97	1370,22	1586,62	2513,02	5462,13
[ppm] H2	76,40	148,72	162,80	115,64	80,54	49,05
mg/m3 NOx	166,49	72,01	120,02	262,93	1016,58	2819,18
°C AT	399,77	505,26	524,71	533,68	546,25	549,37
°C VT	34,02	33,98	34,43	34,56	34,80	34,98
[%] qA	25,71	21,88	21,38	22,22	23,56	25,32
%CO2	6,88	11,14	11,21	10,92	10,45	9,62
[lambda] lambda	2,19	1,32	1,22	1,26	1,31	1,42
[%] REN	73,60	77,44	77,92	77,12	75,79	74,03
[°C] IT	38,05	38,11	38,27	38,44	38,57	38,71
[l/min] Bomb	1,07	1,05	1,04	1,03	1,04	1,05
[°C] TDGS	44,54	52,04	52,23	51,81	51,10	49,77



Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente
Polígono Industrial Cabezo Beaza
C/ Sofía 6-13
30353 Cartagena (Murcia)

cetenma@cetenma.es
www.cetenma.es

T +34 968 52 03 61
F +34 968 52 01 34



ANEXO 5: ENTREGABLE 3.1

ENSAYO DE COMBUSTIBLE DE REFERENCIA

PROPANO

CETENMA posee en propiedad el original de este documento. Las copias que de este documento se suministren tienen carácter confidencial y no podrán ser utilizadas para fines diferentes a aquellos para los cuales son facilitadas, ni tampoco podrán ser reproducidas sin la autorización por escrito de CETENMA.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. MUESTRA	3
3. MATERIALES Y MÉTODOS	5
3.1 GRUPO ELECTRÓGENO DE ENSAYO	5
3.2 MEDIDA DE PARÁMETROS DEL MOTOR.	5
3.3 MEDICIÓN DE EMISIONES.....	7
4. PROGRAMA DE ENSAYOS, ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.	7
4.1 TABLAS DE RESULTADOS.....	8
4.2 PRESTACIONES, CONSUMO Y EMISIONES DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLE PI100B Y EN 590.....	8
5. REGISTRO DE DATOS PRESIÓN PISTÓN-CILINDRO	12

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene los resultados obtenidos en el ensayo del combustible de Referencia Propano como base para los estudios comparativos con combustibles alternativos. El ensayo fue realizado en julio de 2017. Se inicia con una descripción de la muestra de combustible, posteriormente se enumeran los materiales y métodos utilizados para la realización del ensayo y la adquisición de datos, y finalmente, se representan en tablas y gráficas todos los datos monitorizados.

2. MUESTRA

Para el desarrollo del ensayo se ha empleado un combustible denominado PROPANO 100. Las propiedades del mismo se adjuntan en la siguiente tabla:

GAS	PROPANO REFERENCIA
Suministrador	Carbuos Metalicos
Denominación	PROP 100

Composición

Metano (CH ₄)	% molar	-
Etano (C ₂ H ₆)		-
Propano (C ₃ H ₈)		99.50
n-butano (C ₄ H ₁₀)		-
i-butano(2-metilpropano) (C ₄ H ₁₀)		-
n-pentano (C ₅ H ₁₂)		-
i-pentano(2-metilbutano) (C ₅ H ₁₂)		-
n-hexano (C ₆ H ₁₄)		-
Nitrógeno		-
Oxígeno		-
Hidrógeno		-
Sulfuro de hidrógeno		-
Monóxido de carbono		-
Dióxido de carbono		-

Densidad de gas real y volumen específico¹

¹ Calculado con GAS FUEL CALC v 1.0 Software for the Calculation of Gas Fuel Properties for Gas Engines (LMCE Laboratorio de Medida de Emisiones en Motores de Combustión UPCT) a partir de la composición

Densidad	kg/m ³	1.83
Densidad molar	kmol/m ³	0.04
Volumen específico	m ³ /kg	0.55

PODER CALORÍFICO PCS (Gas real)

Base molar		2,220.13
Base másica		50.35
Base volumétrica		101.19

PODER CALORÍFICO PCI (Gas real)

Base molar	MJ/kmol	2,043.23
Base másica	MJ/kg	46.33
Base volumétrica	MJ/m ³ (N)	93.12

Tabla 1: Propiedades del combustible ensayado.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 GRUPO ELECTRÓGENO DE ENSAYO

Los ensayos se realizan en las instalaciones del CETENMA, en concreto en la sala de ensayos del Laboratorio de Motores. En dicho laboratorio se encuentran todos los aparatos de medida y control necesarios, y cuyo recinto está diseñado con las respectivas medidas de seguridad, insonorización, resistencia estructural y resistencia al fuego.

Las principales características del motor empleado son las siguientes:

Tabla 2: Características principales del motor

Características del motor	
Fabricante	YANMAR
Modelo	3GP88-GB1PB
Potencia a plena carga (PRP) (kW)	11,3
Velocidad de ensayo (rpm)	1500
Nº de cilindros	3
Cilindrada total (L)	1,642
Tipo de inyección	Carburación
Angulo inyeccion	15+-1 º antes de TDC
Diámetro x Carrera (mm)	88 x 90
Longitud biela (mm)	132
Relación de compresión	9,4
Combustible	Gas Propano
Peso	143

3.2 MEDIDA DE PARÁMETROS DEL MOTOR.

En los ensayos a realizar en banco de pruebas se llevaría a cabo un registro de las mediciones de los distintos parámetros de operación del motor del banco, en el cual se tienen instalados una serie de sensores y otra instrumentación para el registro de valores de los parámetros de interés durante los ensayos. Algunos de estos son esenciales para el cálculo de emisiones en los gases de

escape, mientras que otros lo son para conocer las condiciones de operación del motor (prestaciones) y su comportamiento. Para obtener una buena medida, los instrumentos requieren estar correctamente calibrados en el momento de la realización del ensayo. Por lo tanto deben compararse periódicamente conforme a las indicaciones del procedimiento de registro general de instrumentos con patrones de medida conocidos y ajustarse convenientemente.

En la siguiente tabla se indican los parámetros medidos en el grupo electrógeno y la instrumentación utilizada.

Tabla 3: Instrumentación del banco de ensayos.

PARÁMETRO A MEDIR	UNIDAD DE MEDIDA	ERROR ADMISIBLE (de lectura)	EQUIPO DE MEDIDA	INCERTIDUMBRE CALIBRACIÓN (de lectura)
Presión atmosférica	mbar		TB-2102 N	±1
Temperatura	°C		LS N-37	±0,3
Humedad relativa	%		LS N-37	±5
Consumo de combustible	g/min	±2	Bronkhorst Flow Controller	±1%
Velocidad de giro del motor	rpm	±2 %	Sentron PAC Siemens	0'1 Hz
Potencia eléctrica	kW	±2 %	Sentron PAC Siemens	±0,1
Presión en colector admisión	°C	±5 %	Sensor de presión	±1,5%
Temperatura gases de escape en colector y cilindros	°C	±15	Termopar-K	±5

3.3 MEDICIÓN DE EMISIONES

Para la medida de emisiones del motor se emplea un analizador de gases de combustión testo 350-XL equipado con sensores de O₂, CO, NO y NO₂, , SO₂, CXHY, NO_x, CO₂ .

Los rangos de medida de las diferentes sondas instaladas son los siguiente:

Tabla 4: Medición de emisiones

	RANGO	EXACTITUD	RESOLUCIÓN	TIEMPO RESPUESTA
O ₂	0 – 25 % Vol	±5 ppm (0 hasta +99 ppm)	1 ppm	30 s
CO	0 – 10000ppm	±10 ppm (0 hasta +199 ppm)	1 ppm	40 s
CO ₂	0 - 50 % Vol.	±0,3 % Vol. + 1 % del v.m. (0 hasta 25 % Vol.) ±0,5 % Vol. + 1,5 % del v.m. (25 hasta 50 % Vol.)	0,01 % Vol. (0 hasta 25 % Vol.) 0,1 % Vol. (> 25 % Vol.)	10 s
NO	0 – 300 ppm	±2 ppm (0 hasta +39,9 ppm)	±0,1 ppm	30 s
NO ₂	0 – 500ppm	±5 ppm (0 hasta +9,99 ppm)	0,1 ppm	40 s
SO ₂	0 – 5000ppm	±5 ppm (0 hasta +99 ppm)	1 ppm	30 s

4. PROGRAMA DE ENSAYOS, ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.

Una vez realizado los ensayos, se han recopilados todos los datos monitorizados en una serie de tablas. Estos datos han sido tratados, para detectar errores de lectura y también para realizar los cálculos necesarios para obtener resultados como por ejemplo las emisiones de gases en g/KWh.

A partir de estos resultados obtenidos, se han representado gráficamente los parámetros más significativos, como son el consumo específico, la temperatura del cilindro 2 y las emisiones de gases, en función de la presión media efectiva.

4.1 TABLAS DE RESULTADOS

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 5: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	0,00	1,27	3,01	5,71	8,40	11,03
Consumo	IN/min	16,90	20,00	25,10	34,10	43,40	53,54
Tª ambiente	°C	32,33	32,97	32,60	32,34	32,55	34,46
Tª colector de admisión	°C	39,24	41,65	38,41	38,56	38,77	43,63
Tª aire despues compresor	°C	34,34	34,22	34,16	0,00	34,29	35,20
Tª escape colector	°C	531,28	564,07	556,76	572,00	589,69	589,69
Tª escape cil.1	°C	539,00	549,78	542,02	546,00	553,00	553,00
Tª escape cil.2	°C	528,68	522,87	527,80	539,00	541,00	541,00
Tª escape cil.3	°C	571,35	573,82	563,39	557,00	550,00	550,00

A continuación, se muestra una recopilación de todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

Tabla 6: Emisiones de gases en % y ppm.

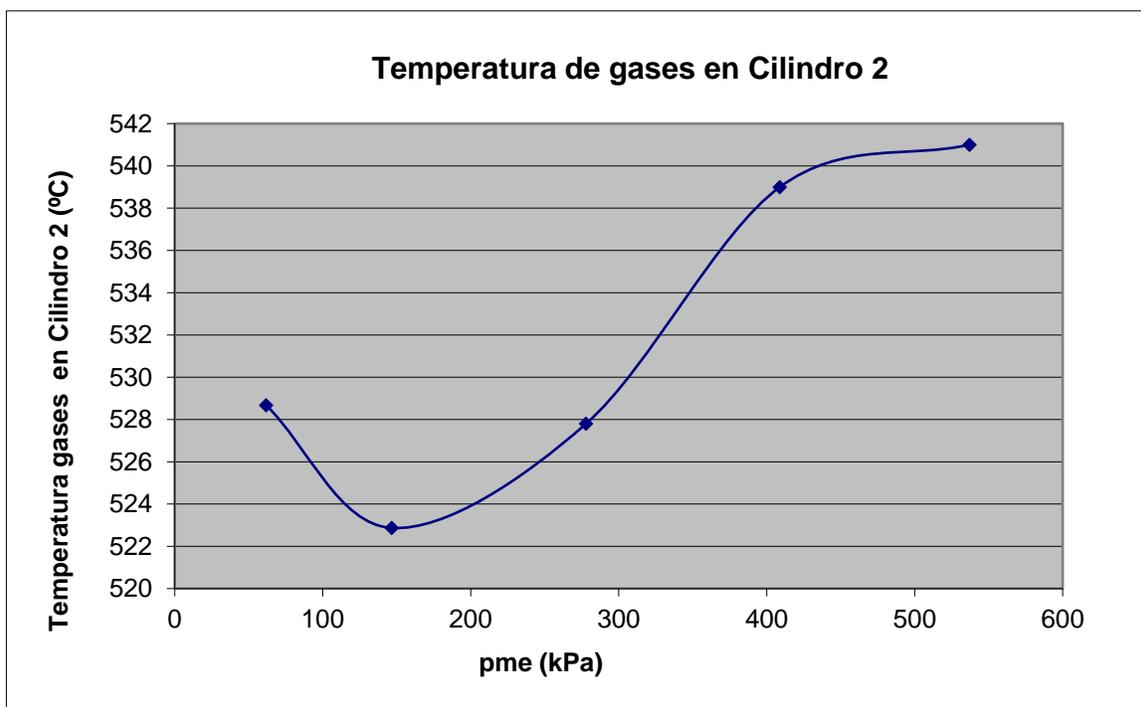
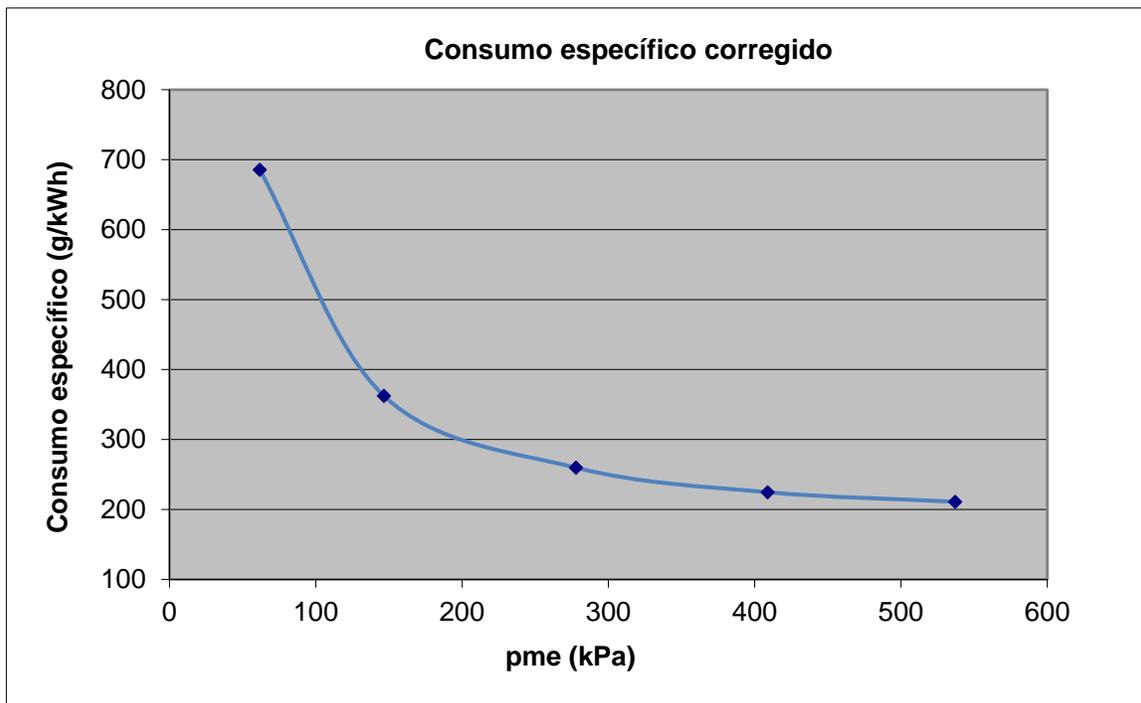
CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	3,40	3,66	4,03	4,39	4,44	4,22
ppm CO	ppm	915,42	814,37	809,74	672,59	508,05	493,26
ppm NO	ppm	45,96	54,94	137,22	504,28	1003,86	2178,32
ppm NO2	ppm	11,31	17,06	26,29	32,17	34,40	41,90
CO2	%	12,17	11,99	11,73	11,48	11,45	11,60
Nox	ppm	57,27	72,00	163,51	536,44	1038,26	2220,22

Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/KWh, se han realizado una serie de cálculos para obtener la siguiente tabla.

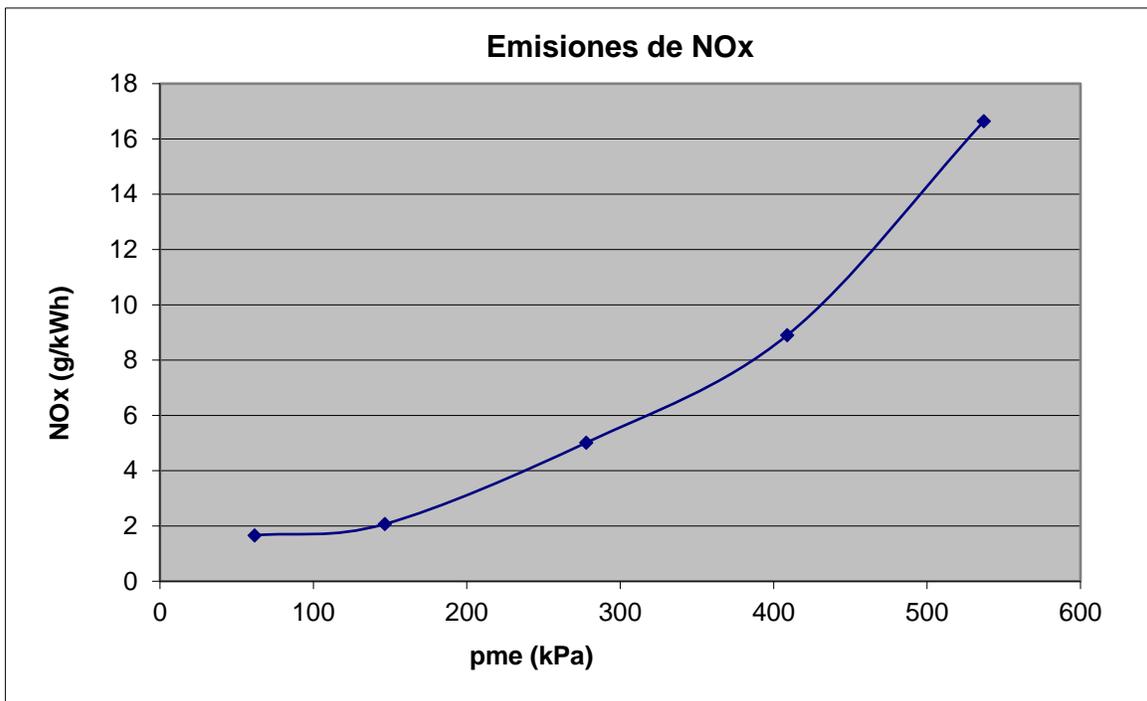
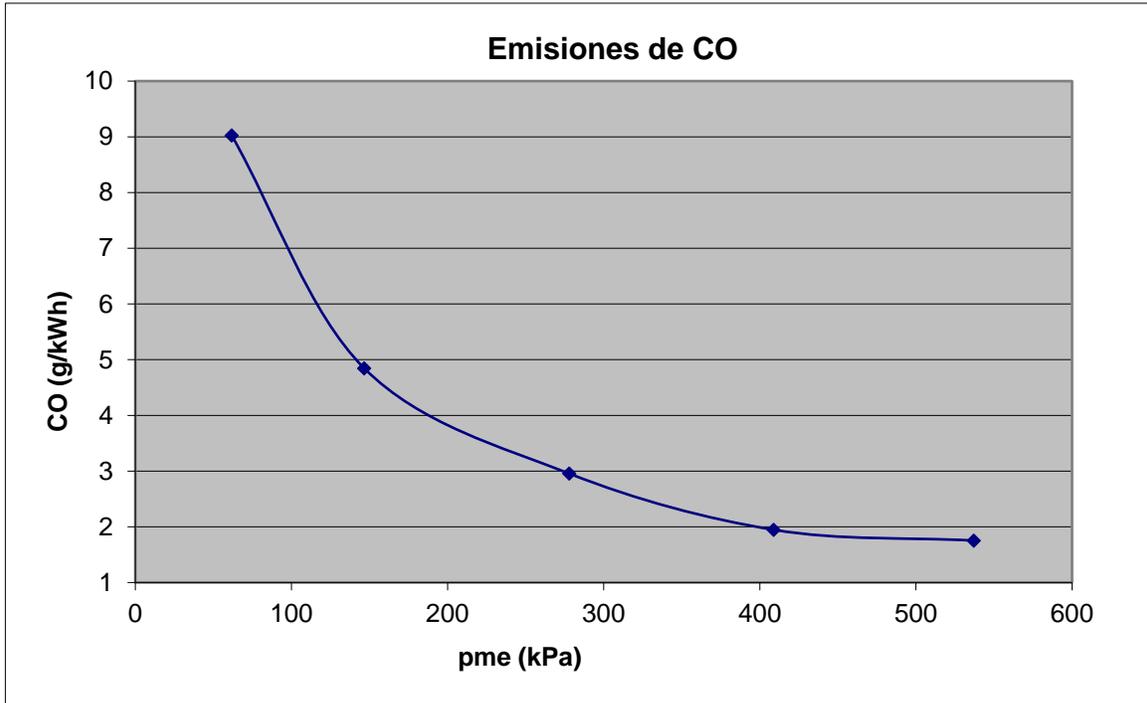
CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/KWh	-	1,66	2,07	5,01	8,90	16,64
bs CO	g/KWh	-	9,02	4,85	2,96	1,95	1,75
bs CO2	g/KWh	-	1890,32	998,92	716,45	620,06	582,24

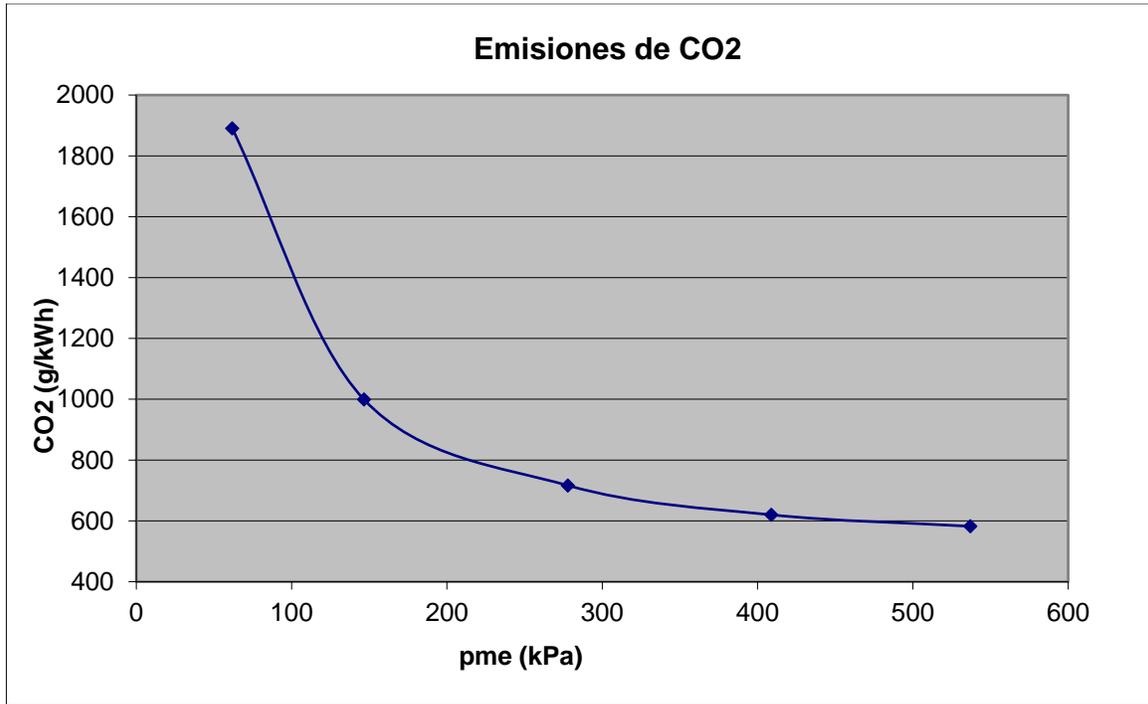
4.2 PRESTACIONES, CONSUMO Y EMISIONES DEL PROPANO.

En las siguientes dos gráficas quedan representados los valores monitorizados del consumo específico y la temperatura en el cilindro 2 en función de la presión media efectiva.



A continuación, se hace una representación gráfica de los valores registrados por el analizador de gases en función de la presión media efectiva. Los gases representados son CO, CO₂ y NO_x.





5. REGISTRO DE DATOS PRESIÓN PISTÓN-CILINDRO

En las siguientes ilustraciones se muestran los datos de partida.

ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS DE PRESIÓN CILINDRO [InCylinderDAQ&T.vi] Front Panel on PresionCilindro.lvproj/My Computer *

File Edit View Project Operate Tools Window Help

24pt Application Font

Controles **Filtrado** **Referencia Presión** **Adquisición Tiempo Real** **Parámetros Calculados** **Ciclo Medio**

Geometría del Motor

Diámetro Cilindro (mm)	Radio Manivela (mm)
88	45
Carrera Pistón (mm)	lambda
90	0,34
Longitud Biela (mm)	Volumen TDC (cc)
132	30,2
Relación Compresión	Cilindrada Unitaria (cc)
19,1	547,4
Número Cilindros	Cilindrada Total (cc)
3	1642,2

Desfase Presión Admisión

Distancia Sensor-Válvula Admisión (mm)	Gasto Aire (kg/h)
0	81
Temperatura Aire Admisión (°C)	Gasto Combustible (kg/h)
32	0

Gasto Aire - Combustible

Control del Ciclo de Adquisición

Trigger TDC	Trigger PcyI
Flanco Óptico Ascendente	Nivel Alto
Flanco Ascendente Óptico (V)	Nivel Alto Presión Cilindro (V)
3	1

Dientes Volante Inercia: 127

Temporizador (micro-s): 0

Puede ser necesario para adquirir un ciclo completo cuando el régimen de giro es muy bajo. Añade este intervalo de tiempo entre las muestras de las diferentes señales.

Diagrama de Distribución

IVO (deg)	714
IVC (deg)	218
EVO (deg)	484
EVC (deg)	12
IT (deg)	344

ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS DE PRESIÓN CILINDRO [InCylinderDAQ&T.vi] Front Panel on PresionCilindro.lvproj/My Computer *

File Edit View Project Operate Tools Window Help

24pt Application Font

Controles **Filtrado** **Referencia Presión** **Adquisición Tiempo Real** **Parámetros Calculados** **Ciclo Medio**

Capturar Señales

Una vez definido el filtrado a realizar a las diferentes señales, pasamos a obtener la curva de presión cilindro en función del volumen.

Filtrado Señales

Presión Admisión | Presión Cilindro

Selección Filtro: FFT | Frecuencia de Corte: 3000

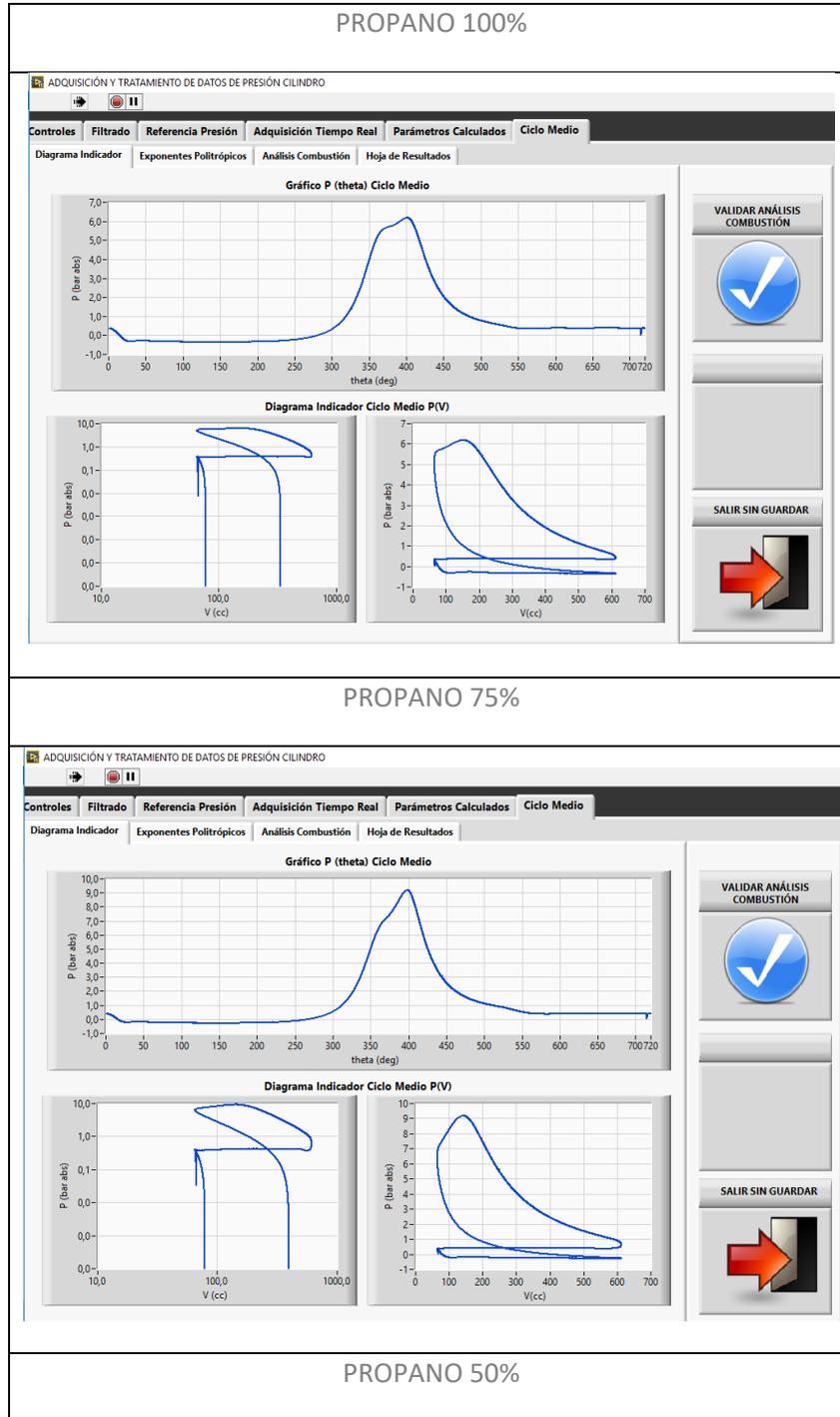
Señal Filtrada | Señal NO Filtrada

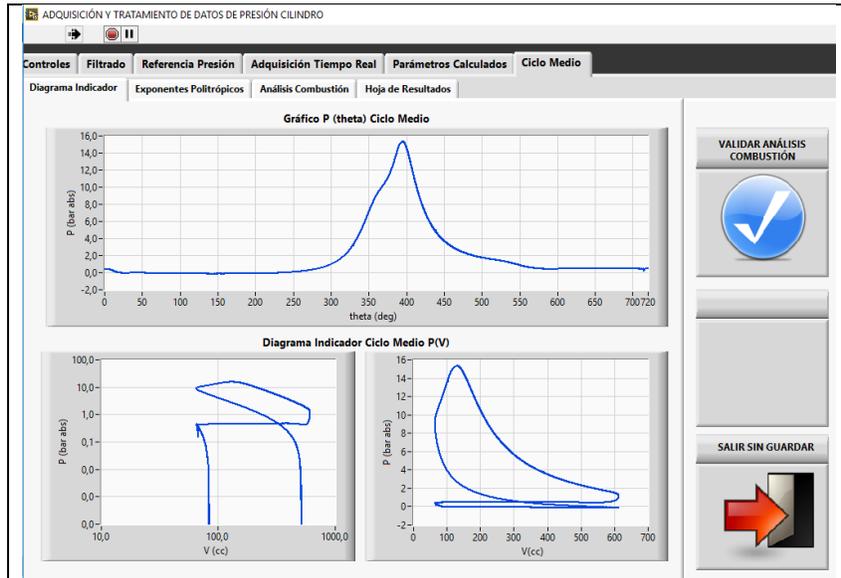
Presión Cilindro

Amplitud vs f (Hz)

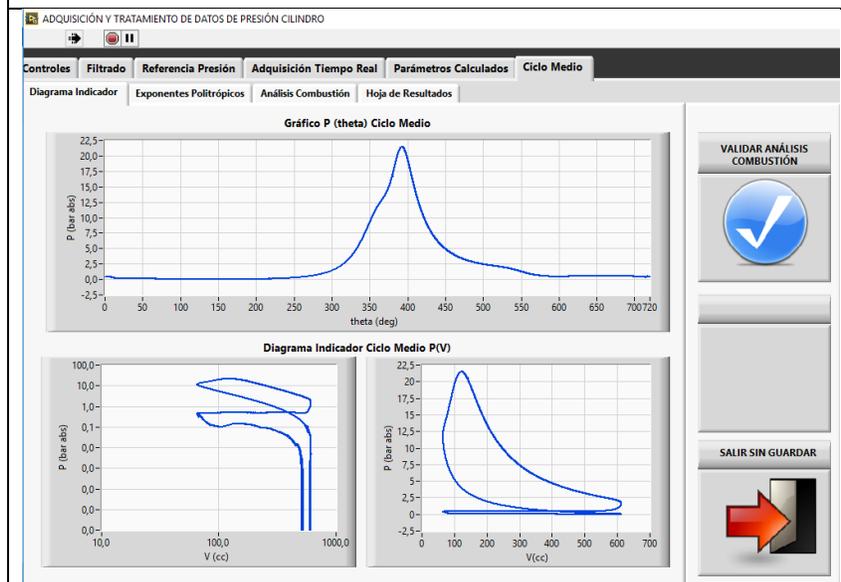
F. Permisadas | F. Eliminadas

A continuación, se muestran los gráficos de los datos obtenidos para ciclo medio para cada una de las cargas del ensayo:

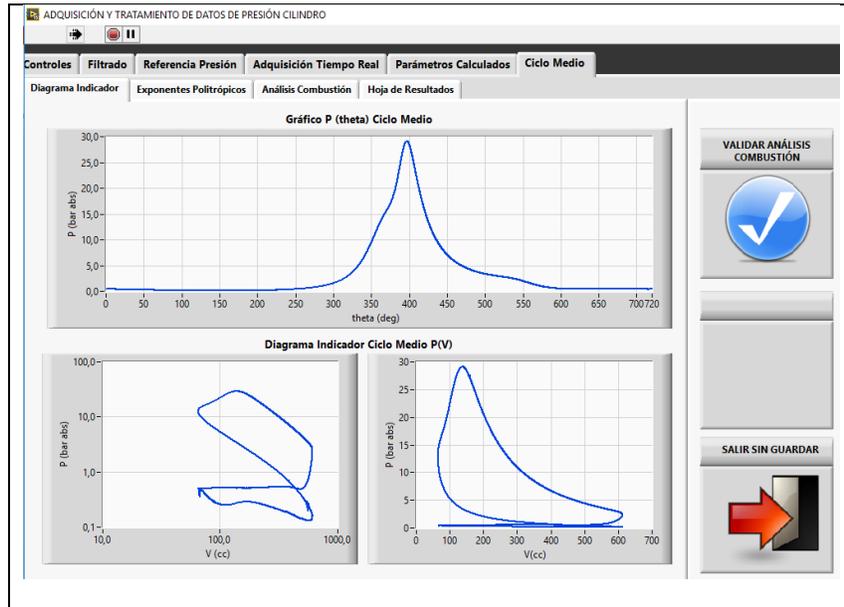




PROPANO 25%



PROPANO 10%





Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente
Polígono Industrial Cabezo Beaza
C/ Sofía 6-13
30353 Cartagena (Murcia)

cetenma@cetenma.es

www.cetenma.es

T +34 968 52 03 61

F +34 968 52 01 34



ANEXO 5: ENTREGABLE 3.1

ENSAYO DE COMBUSTIBLE DE REFERENCIA EN-590

CETENMA posee en propiedad el original de este documento. Las copias que de este documento se suministren tienen carácter confidencial y no podrán ser utilizadas para fines diferentes a aquellos para los cuales son facilitadas, ni tampoco podrán ser reproducidas sin la autorización por escrito de CETENMA.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. MUESTRA.....	3
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
3.1 GRUPO ELECTRÓGENO DE ENSAYO	4
3.2 MEDIDA DE PARÁMETROS DEL MOTOR.	5
3.3 MEDICIÓN DE EMISIONES.....	6
4. PROGRAMA DE ENSAYOS, ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.	8
4.1 PROGRAMA DE ENSAYOS	8
4.2 RESULTADOS	8
4.3 TABLAS DE RESULTADOS	8
4.4 PRESTACIONES, CONSUMO Y EMISIONES.	9
5. REGISTRO DE DATOS PRESIÓN PISTÓN-CILINDRO.....	14

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene los resultados obtenidos en el ensayo del combustible de Referencia EN-590 como base para los estudios comparativos con combustibles alternativos. Se inicia con una descripción de la muestra de combustible, posteriormente se enumeran los materiales y métodos utilizados para la realización del ensayo y la adquisición de datos, y finalmente, se representan en tablas y gráficas todos los datos monitorizados.

2. MUESTRA

La muestra utilizada para la realización del ensayo se trata de un gasóleo A sin aditivos, al que se denomina como EN-590. En la siguiente tabla se especifica la fecha de recogida del mismo así como su procedencia y el volumen del que se disponía.

Este combustible se ha utilizado como combustible de referencia para la comparación del mismo frente a otros combustibles.

Tabla 1: Combustible empleado.

Denominación muestra de combustible	Procedencia	Preparación de la muestra	Volumen
EN-590	EN590 SARAS	-	20 litros

¹ Gasóleo A sin aditivar.

Real Decreto 1088/2010, de 3 de septiembre, porque se modifica el real decreto 61/2006 del 31 de enero, en lo relativo a las especificaciones técnicas de gasolinas, gasóleos, utilización de biocarburantes y contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 GRUPO ELECTRÓGENO DE ENSAYO

Los ensayos se realizan en las instalaciones del CETENMA, en concreto en la sala de ensayos del Laboratorio de Motores. En dicho laboratorio se encuentran todos los aparatos de medida y control necesarios, y cuyo recinto está diseñado con las respectivas medidas de seguridad, insonorización, resistencia estructural y resistencia al fuego.

El grupo de ensayo es un grupo electrógeno HYW-13 M5 de 13 kW de potencia con un motor YANMAR 3TNV88 y un alternador BCI 184 E de potencia 13 kW. Las características técnicas más importantes del grupo electrógeno de ensayo se recopilan en la siguiente tabla.

Tabla 2: Características técnicas del grupo electrógeno de ensayo

Fabricante	YANMAR
Modelo	3TNV88-GGE
Nº cilindros	3 en línea
Cilindrada	1.643,2 cm ³
Potencia máxima	13,2 kW a 1500 rpm
Relación compresión	19,1/1
Combustible	Diesel
Orden de encendido	1-3-2
Ciclo de operación	4T
Sistema de refrigeración	Circuito cerrado: motor-intercambiador, impulsión bomba motor.
Sistema de combustible	Inyección directa / Bomba en línea e inyectores
Válvulas	2 por cilindro

3.2 MEDIDA DE PARÁMETROS DEL MOTOR.

En los ensayos a realizar en banco de pruebas se llevaría a cabo un registro de las mediciones de los distintos parámetros de operación del motor del banco, en el cual se tienen instalados una serie de sensores y otra instrumentación para el registro de valores de los parámetros de interés durante los ensayos. Algunos de estos son esenciales para el cálculo de emisiones en los gases de escape, mientras que otros lo son para conocer las condiciones de operación del motor (prestaciones) y su comportamiento. Para obtener una buena medida, los instrumentos requieren estar correctamente calibrados en el momento de la realización del ensayo. Por lo tanto deben compararse periódicamente conforme a las indicaciones del procedimiento de registro general de instrumentos con patrones de medida conocidos y ajustarse convenientemente.

En la siguiente tabla se indican los parámetros medidos en el grupo electrógeno y la instrumentación utilizada.

Tabla 3: Instrumentación del banco de ensayos.

PARÁMETRO A MEDIR	UNIDAD DE MEDIDA	ERROR ADMISIBLE (de lectura)	EQUIPO DE MEDIDA	INCERTIDUMBRE CALIBRACIÓN (de lectura)
Presión atmosférica	mbar		TB-2102 N	±1
Temperatura	°C		LS N-37	±0,3
Humedad relativa	%		LS N-37	±5
Temperatura combustible	°C	±2	Termopar-T	±1
Consumo de combustible	g/min	±2	Célula carga	±1
Velocidad de giro del motor	rpm	±2 %	Sentron PAC Siemens	0'1 Hz

Potencia eléctrica	kW	±2 %	Sentron PAC Siemens	±0,1
Temperatura lubricante	°C	±15	Termopar-T	±1
Presión lubricante	bar	n/e		n/e
Temperatura entrada agua radiador	°C	±15	PT 100	±0,3
Temperatura salida agua radiador	°C	±15	PT 100	±0,3
Temperatura agua motor	°C	n/e	PT 100	±0,3
Temperatura aire admisión	°C	±2	PT 100	±0,3
Presión en colector admisión	°C	±5 %	Sensor de presión	±1,5%
Temperatura gases de escape	°C	±15	Termopar-K	±5
Contrapresión de escape	mbar	±5 %	Sensor presión	±1/5
Coefficiente absorción gases escape húmedos	m ⁻¹	n/e	Opacímetro MOTORSENS MAC 2012	±0,025

3.3 MEDICIÓN DE EMISIONES

Para la medida de emisiones del motor se emplea un analizador de gases de combustión testo 350-XL equipado con sensores de O₂, CO, NO y NO₂, , SO₂, CXHY, NO_x y CO₂ .

Los rangos de medida de las diferentes sondas instaladas son los siguiente:

Tabla 4: Rangos de medida

	RANGO	EXACTITUD	RESOLUCIÓN	TIEMPO RESPUESTA
O ₂	0 – 25 % Vol	±5 ppm (0 hasta +99 ppm)	1 ppm	30 s
CO	0 – 10000ppm	±10 ppm (0 hasta +199 ppm)	1 ppm	40 s
CO ₂	0 - 50 % Vol.	±0,3 % Vol. + 1 % del v.m. (0 hasta 25 % Vol.) ±0,5 % Vol. + 1,5 % del v.m. (25 hasta 50 % Vol.)	0,01 % Vol. (0 hasta 25 % Vol.) 0,1 % Vol. (> 25 % Vol.)	10 s
NO	0 – 300 ppm	±2 ppm (0 hasta +39,9 ppm)	±0,1 ppm	30 s
NO ₂	0 – 500ppm	±5 ppm (0 hasta +9,99 ppm)	0,1 ppm	40 s
SO ₂	0 – 5000ppm	±5 ppm (0 hasta +99 ppm)	1 ppm	30 s

4. PROGRAMA DE ENSAYOS, ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.

4.1 PROGRAMA DE ENSAYOS

Los ensayos se han realizado en julio de 2017, en un motor de combustión diésel de 3 cilindros de aplicación a grupos electrógenos de 15 Kva.

Tabla 5: Programa de ensayos en motor diésel.

Ensayo	Muestra de combustible	Fecha	Porcentaje de carga ref. a nominal y velocidad de giro del motor
1	EN-590	12/07/2017	10%-25%-50%-75%-100% @ 1500 rpm

¹ Gasóleo A sin aditivar.

Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, por el que se determinan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes.

4.2 RESULTADOS

Una vez realizado los ensayos, se han recopilados todos los datos monitorizados en una serie de tablas. Estos datos han sido tratados, para detectar errores de lectura y también para realizar los cálculos necesarios para obtener resultados como por ejemplo las emisiones de gases en g/KWh.

A partir de estos resultados obtenidos, se han representado gráficamente los parámetros más significativos, como son el consumo específico frente a la presión media efectiva, la temperatura cilindro del cilindro 2 frente a la presión media efectiva, y por último, las emisiones de gases frente a la presión media efectiva.

4.3 TABLAS DE RESULTADOS

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 6: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	-	1,90	3,54	6,84	10,03	13,36
Consumo	g/kWh	-	465,20	315,46	243,94	220,71	214,17
Tª ambiente	°C	-	23,63	23,35	24,31	23,93	23,62
Tª colector de admisión	°C	-	31,65	32,07	33,34	34,72	34,35
Tª aire despues compresor	°C	-	24,74	24,59	24,24	23,16	21,72
Tª escape colector	°C	-	156,16	188,57	266,34	362,27	464,64
Tª escape cil.1	°C	-	161,87	194,61	272,27	358,61	459,09
Tª escape cil.2	°C	-	160,07	192,43	265,10	351,51	451,26
Tª escape cil.3	°C	-	160,21	190,14	255,67	325,93	406,59

A continuación, se muestran todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

Tabla 7: Emisiones de gases en % y ppm

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	-	17,40	16,46	14,36	11,92	8,87
ppm CO	ppm	-	323,41	332,73	281,10	204,87	192,99
ppm NO	ppm	-	132,46	171,79	282,98	421,32	544,50
ppm HC	ppm	-	207,87	201,34	193,98	164,38	183,02
CO2	%	-	2,41	3,04	4,62	6,45	8,76
Nox	ppm	-	183,36	236,40	347,73	474,47	597,78

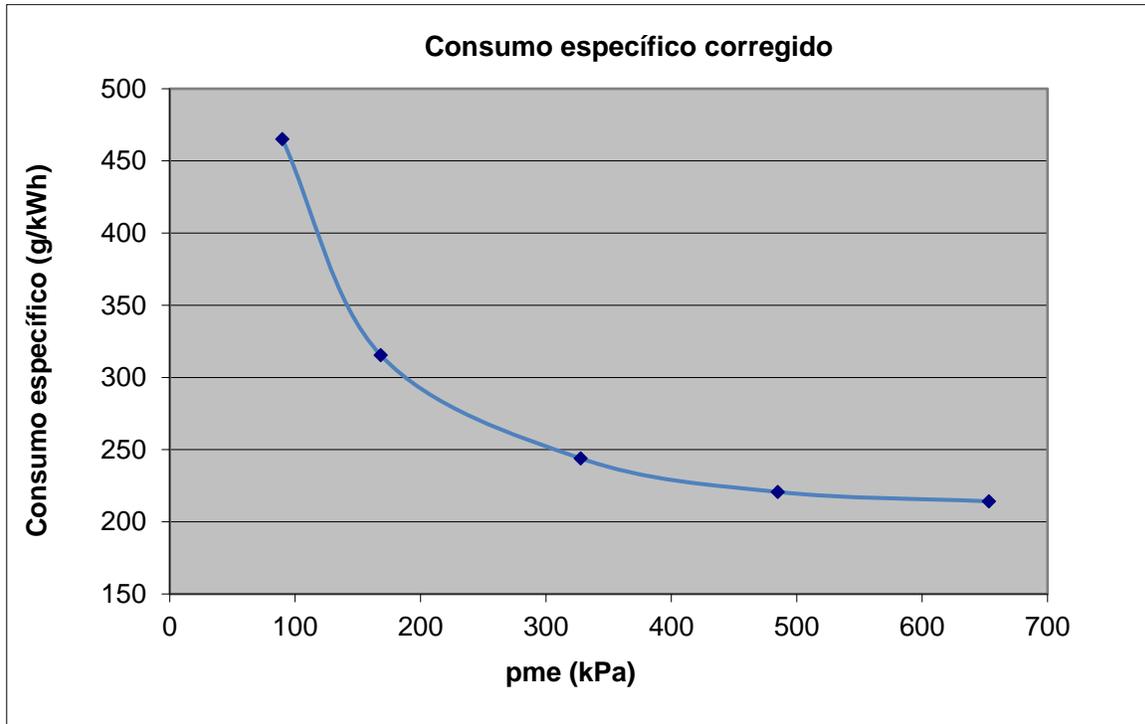
Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/KWh, se han realizado una serie de cálculos para obtener las siguiente tabla.

Tabla 8: Emisiones de gases en g/KWh

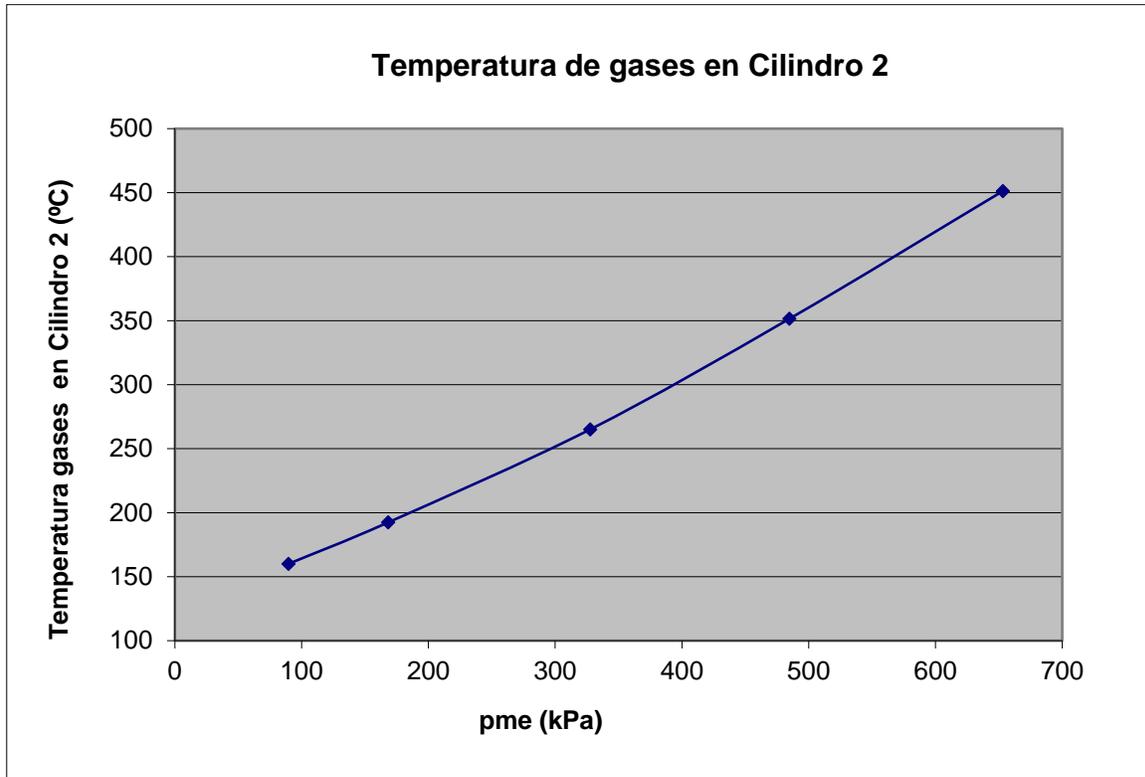
CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/kWh	-	11,11	7,48	5,62	5,05	4,65
bs CO	g/kWh	-	12,41	6,85	2,97	1,41	0,95
bs HC1	g/kWh	-	4,05	2,12	1,06	0,59	0,49
bs CO2	g/kWh	-	1452,43	983,99	766,11	697,01	679,99

4.4 PRESTACIONES, CONSUMO Y EMISIONES.

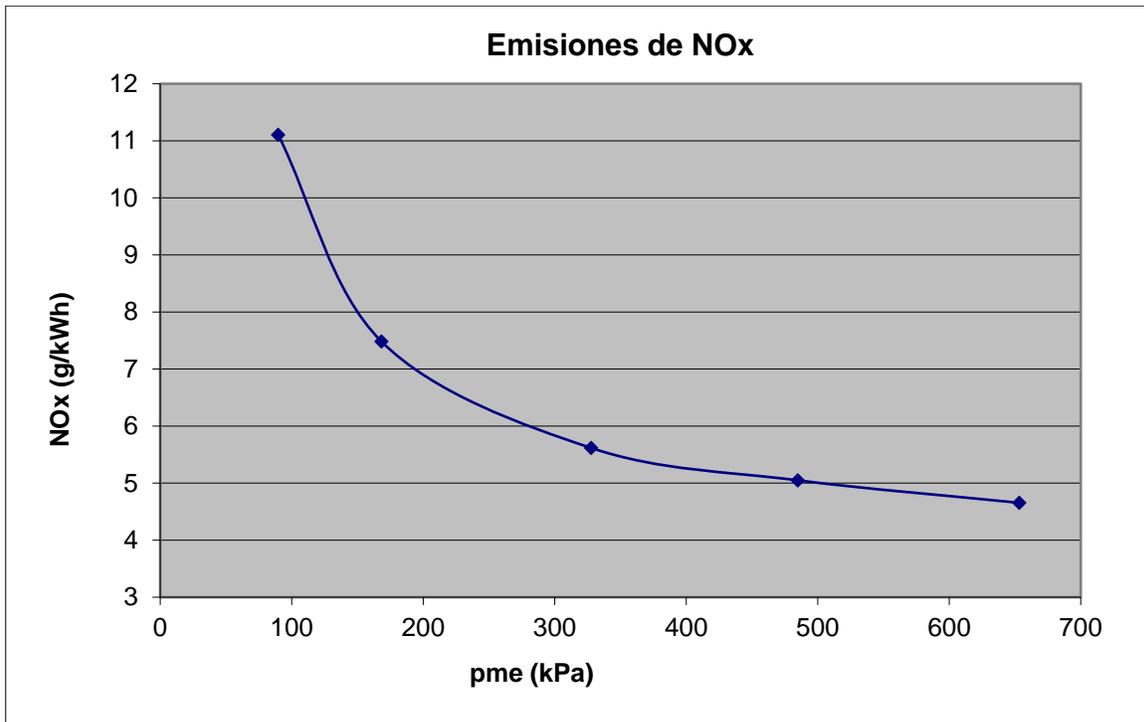
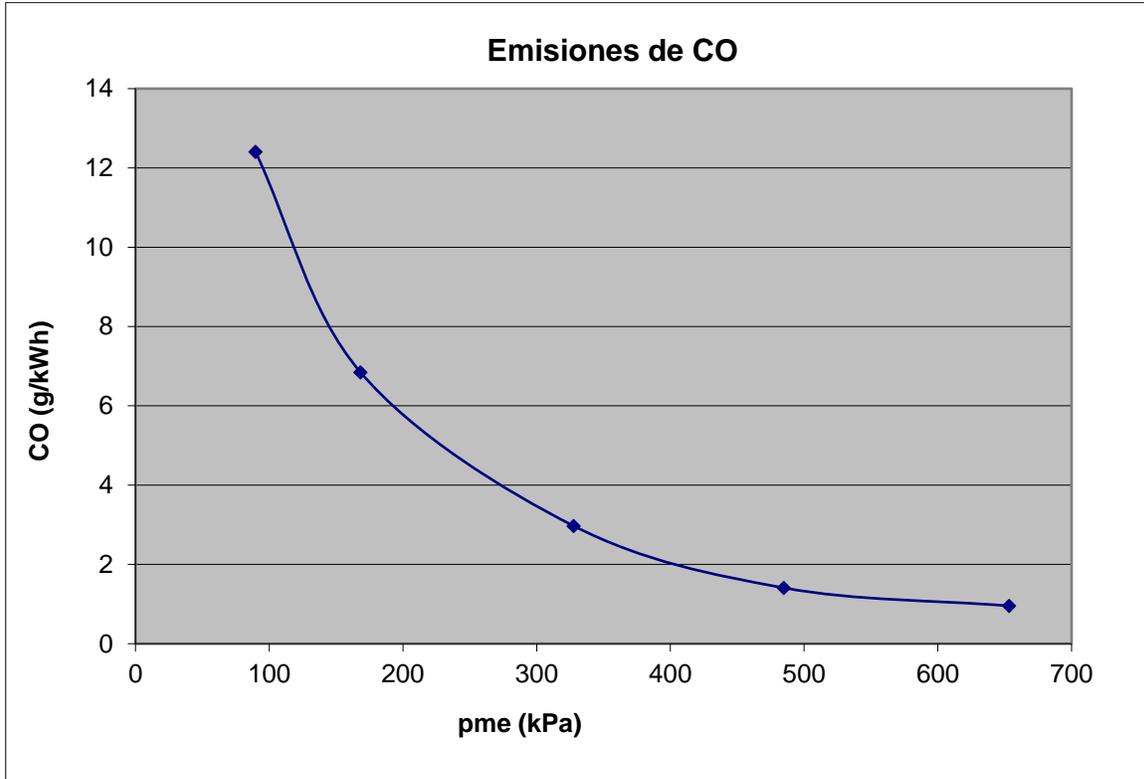
En las siguientes gráfica se muestra la variación del consumo específico en función de la presión media efectiva. Se observa que conforme aumenta la carga, aumenta la presión media efectiva y por tanto disminuye el consumo específico.

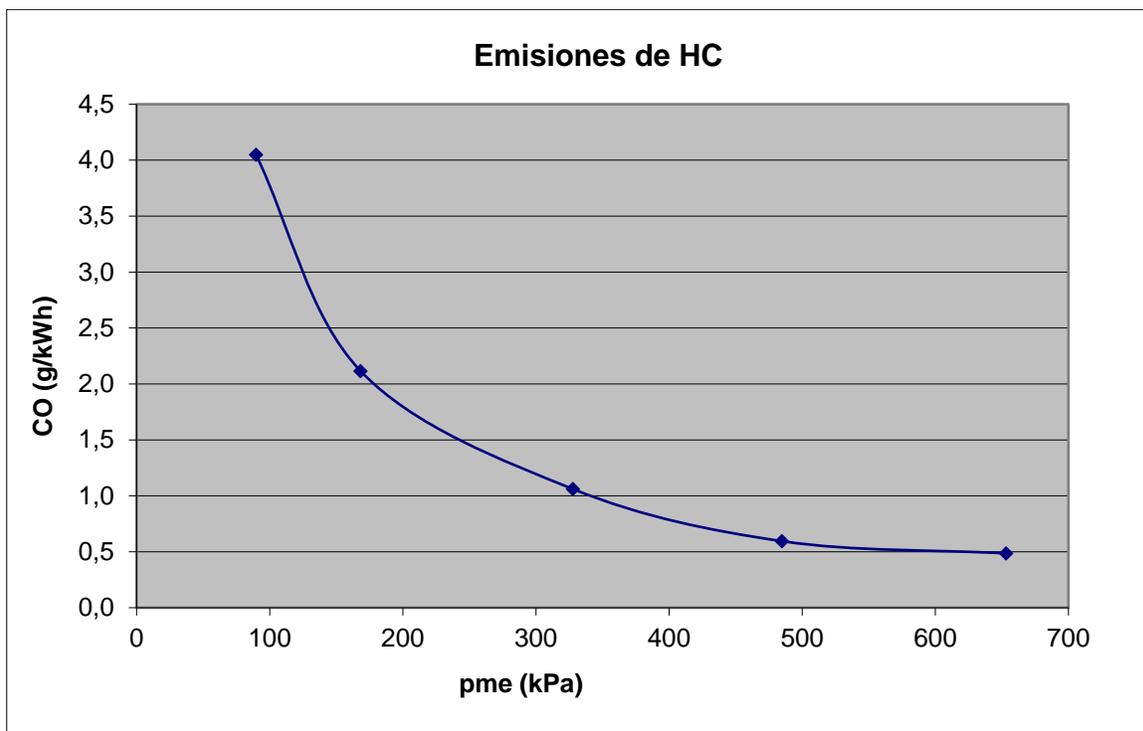


Para ver como varía la temperatura en los cilindros en función de la pme se ha seleccionado el cilindro 2. En la gráfica siguiente se puede contemplar que a medida que aumenta la carga y con ella la presión media efectiva, la temperatura aumenta.



En las siguientes 3 graficas se ha representado las emisiones de gases que se han considerado más importantes en g/kWh frente a la presión media efectiva.





5. REGISTRO DE DATOS PRESIÓN PISTÓN-CILINDRO

En las siguientes ilustraciones se muestran los datos de partida.

ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS DE PRESIÓN CILINDRO [InCylinderDAQ&T.vi] Front Panel on PresionCilindro.lvproj/My Computer *

File Edit View Project Operate Tools Window Help

24pt Application Font

Controles | **Filtrado** | **Referencia Presión** | **Adquisición Tiempo Real** | **Parámetros Calculados** | **Ciclo Medio**

Geometría del Motor

Diámetro Cilindro (mm)	Radio Manivela (mm)
88	45
Carrera Pistón (mm)	lambda
90	0.34
Longitud Biela (mm)	Volumen TDC (cc)
132	30.2
Relación Compresión	Cilindrada Unitaria (cc)
19.1	547.4
Número Cilindros	Cilindrada Total (cc)
3	1642.2

Desfase Presión Admisión

Distancia Sensor-Válvula Admisión (mm)	Gasto Aire (kg/h)
0	81
Temperatura Aire Admisión (°C)	Gasto Combustible (kg/h)
32	0

Gasto Aire - Combustible

Control del Ciclo de Admisión

Trigger TDC	Trigger Pcyf
Flanco Óptico Ascendente	Nivel Alto
Flanco Ascendente Óptico (V)	Nivel Alto Presión Cilindro (V)
3	1

Dientes Volante Inercia: 127

Temporizador (micro-s): 0

Puede ser necesario para adquirir un ciclo completo cuando el régimen de giro es muy bajo. Añade este intervalo de tiempo entre las muestras de las diferentes señales.

Diagrama de Distribución

IVO (deg)	714
IVC (deg)	218
EVO (deg)	484
EVC (deg)	12
IT (deg)	344

ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS DE PRESIÓN CILINDRO [InCylinderDAQ&T.vi] Front Panel on PresionCilindro.lvproj/My Computer *

File Edit View Project Operate Tools Window Help

24pt Application Font

Controles | **Filtrado** | **Referencia Presión** | **Adquisición Tiempo Real** | **Parámetros Calculados** | **Ciclo Medio**

Capturar Señales

Una vez definido el filtrado a realizar a las diferentes señales, pasamos a obtener la curva de presión "cilindro en función del volumen"

Filtrado Señales

Presión Admisión | Presión Cilindro

Selección Filtro: FFT | Frecuencia de Corte: 3000

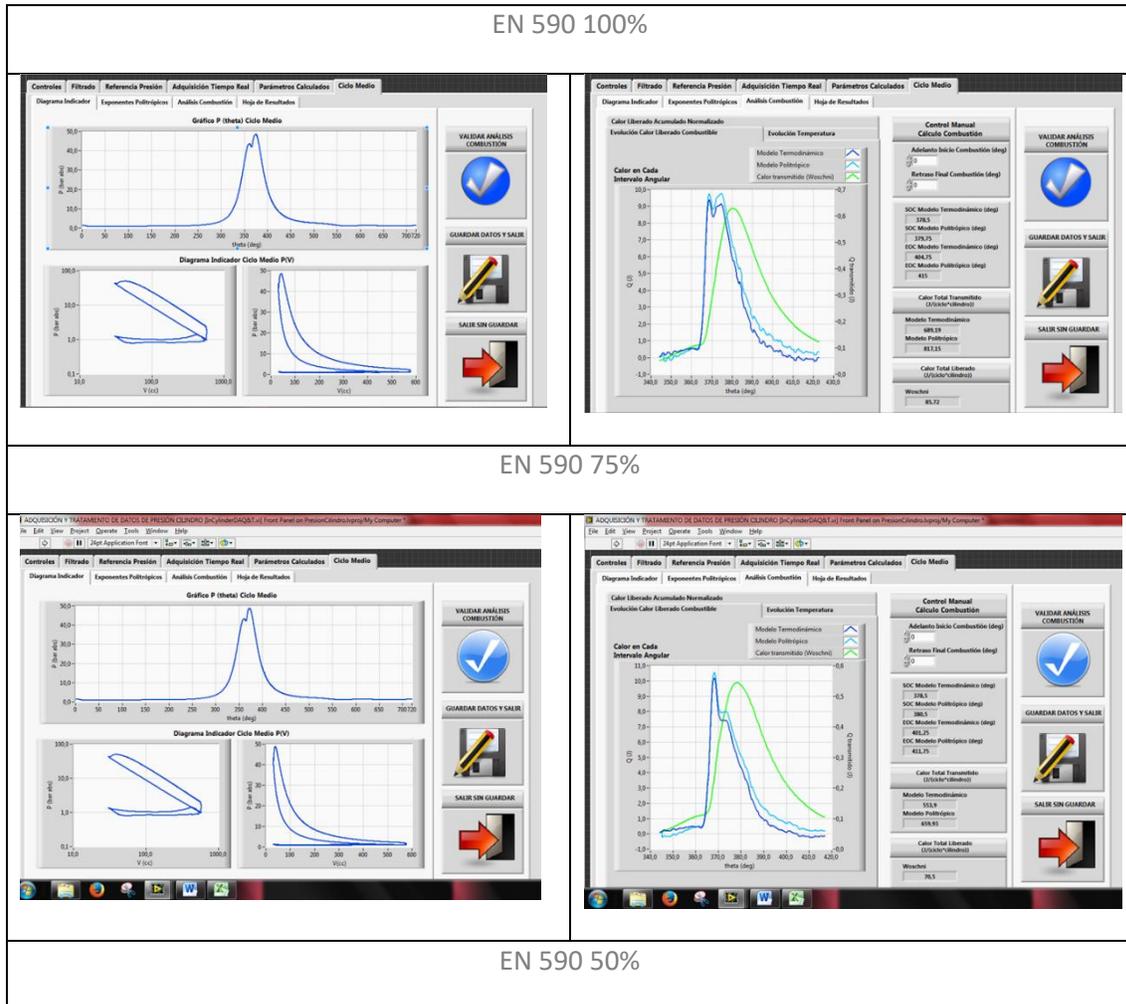
Señal Filtrada: [X] | Señal NO Filtrada: [X]

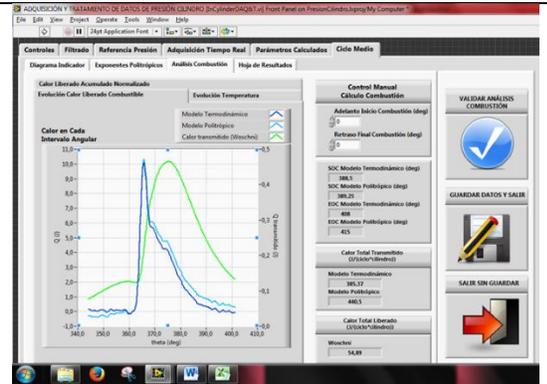
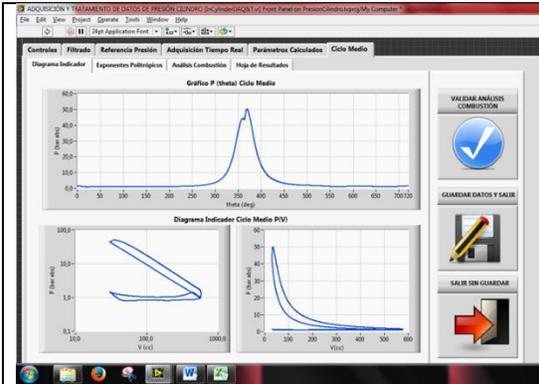
Presión Cilindro

Espectro Frecuencias

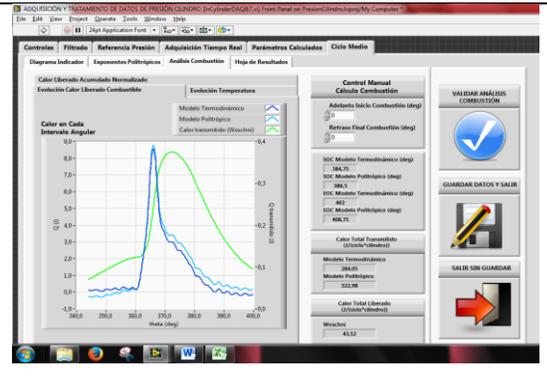
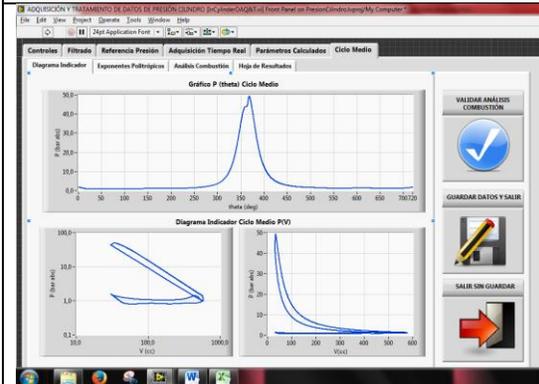
F. Permisadas: [1] | F. Eliminadas: [1]

A continuación, se muestran los gráficos de los datos obtenidos para ciclo medio para cada una de las cargas del ensayo:

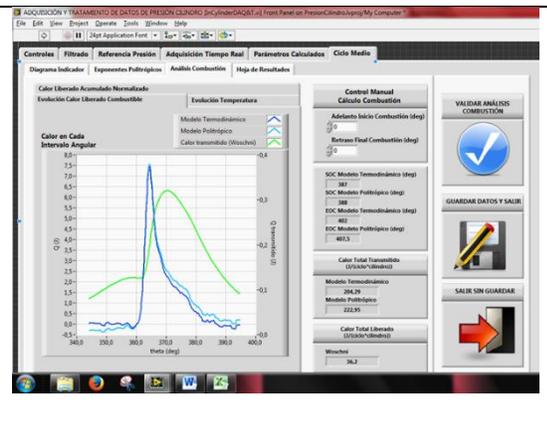
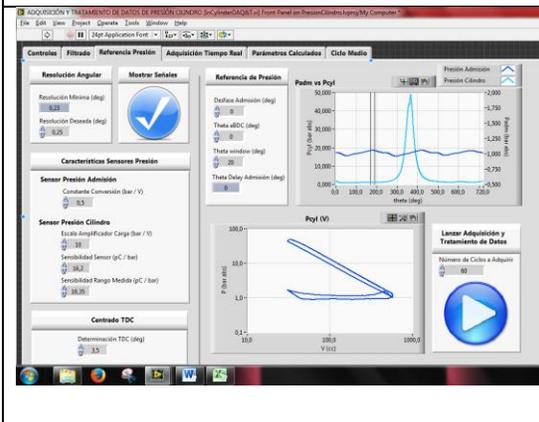




EN 590 25%



EN 590 10%





Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente
Polígono Industrial Cabezo Beaza
C/ Sofía 6-13
30353 Cartagena (Murcia)

cetenma@cetenma.es

www.cetenma.es

T +34 968 52 03 61

F +34 968 52 01 34



ANEXO 5: ENTREGABLE 3.1

ENSAYO DE COMBUSTIBLE DE REFERENCIA PROPANO

CETENMA posee en propiedad el original de este documento. Las copias que de este documento se suministren tienen carácter confidencial y no podrán ser utilizadas para fines diferentes a aquellos para los cuales son facilitadas, ni tampoco podrán ser reproducidas sin la autorización por escrito de CETENMA.



ANEXO 5: ENTREGABLE 3.1

ENSAYO DE COMBUSTIBLE DE REFERENCIA EN-590

CETENMA posee en propiedad el original de este documento. Las copias que de este documento se suministren tienen carácter confidencial y no podrán ser utilizadas para fines diferentes a aquellos para los cuales son facilitadas, ni tampoco podrán ser reproducidas sin la autorización por escrito de CETENMA.



ANEXO 6: ENTREGABLE 4.1

ENSAYOS DE COMBUSTIBLE OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS

CETENMA posee en propiedad el original de este documento. Las copias que de este documento se suministren tienen carácter confidencial y no podrán ser utilizadas para fines diferentes a aquellos para los cuales son facilitadas, ni tampoco podrán ser reproducidas sin la autorización por escrito de CETENMA.



ANEXO 6: ENTREGABLE 4.1

ENSAYOS DE COMBUSTIBLE OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS

CETENMA posee en propiedad el original de este documento. Las copias que de este documento se suministren tienen carácter confidencial y no podrán ser utilizadas para fines diferentes a aquellos para los cuales son facilitadas, ni tampoco podrán ser reproducidas sin la autorización por escrito de CETENMA.

1. INTRODUCCIÓN	3
2. PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS	3
2.1 MUESTRAS	3
2.2 ESTADO DE LAS MUESTRAS MEDIANTE PRECIPITACIÓN NATURAL (250 ML). ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
2.3 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLES.	4
2.4 MEZCLAS DE COMBUSTIBLE PROCEDENTE DE PIRÓLISIS Y GASÓLEO	6
3. MATERIALES Y MÉTODOS	7
3.1 GRUPO ELECTRÓGENO DE ENSAYO.	7
3.2 MEDIDA DE PARÁMETROS DEL MOTOR.	8
3.3 MEDICIÓN DE EMISIONES.....	9
4. PROGRAMA DE ENSAYOS, ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.	11
4.1 PROGRAMA DE ENSAYOS.....	11
4.2 RESULTADOS.....	11
4.3 TABLAS DE RESULTADOS.....	12
4.3.1 PI20B.....	12
4.3.2 PI40B.....	13
4.3.3 PI60B.....	14
4.3.4 PI80B.....	15
4.3.5 PI100B.....	17
4.4 PRESTACIONES, CONSUMO Y EMISIONES DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLE PI100B Y EN 590.....	18
5. REGISTRO DE DATOS PRESIÓN PISTÓN-CILINDRO	23
5.1 PI20B.....	24
5.2 PI40B.....	26
5.3 PI60B.....	28
5.4 PI80B.....	30
5.5 PI100B.....	32

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene los resultados obtenidos en el ensayo realizado en septiembre de 2017 del combustible obtenido mediante pirólisis de residuos plásticos. Se inicia con una descripción de la muestra de combustible, posteriormente se enumeran los materiales y métodos utilizados para la realización del ensayo y la adquisición de datos, y finalmente, se representan en tablas y gráficas todos los datos monitorizados.

2. PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS

2.1 MUESTRA

La muestra de combustible pertenece a un combustible procedente de la pirólisis de residuos plásticos y se encontraba almacenada en las instalaciones de CETENMA.

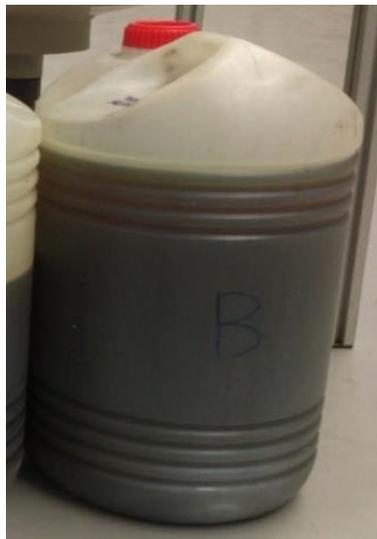


Ilustración 1: Muestra B del combustible procedente de la pirólisis de residuos plásticos.

2.2 Propiedades físico-químicas de los combustibles.

La muestra B correspondiente al combustible que proviene de la pirólisis de residuos plásticos se ha analizado en laboratorio para obtener sus propiedades físico-químicas y comparado con la normativa UNE EN-590 de automoción y se adjuntan los resultados de los análisis en la tabla siguiente donde los valores en rojo no cumplen la norma establecida.

Tabla 1: Comparativa de propiedades PI100B frente a la normativa UNE EN590 de automoción.

		MÍNIMO	MÁXIMO	PI100B	NORMA
Índice de cetano		46	-	55.9	ASTM D4737 o EN-ISO4264
Densidad a 15°C*	kg/m3	820	845	778.9	EN-ISO3675 ASTM D4052
Contenido en azufre	mg/kg	-	10	17.8	EN-ISO20846
Destilación					EN-ISO3405 ASTM D86
Punto inicial	°C			62.5	
10% recogido	°C			119.8	
50% recogido	°C			219	
65% recogido	°C	250		274	
80% recogido	°C			339.4	
85% recogido	°C		350	355.4	
90% recogido	°C			359.1	
95% recogido	°C			359.1	
Punto final	°C			354.1	
Pérdida	% V/V			2.4	
Residuo	% V/V			1.4	
Viscosidad cinemática 40°C	mm ² /s	2	4,5	1,43	EN-ISO3104 ASTM D445

Punto de inflamación	°C	55		23	EN-ISO2719 ASTM D93
Punto de obstrucción al filtro en frío	°C		<10(INV.) ó 0(VE)	-8	EN-116
Residuo carbonoso (sobre el 10% v/v residuo de destilación)	%m/m		0.3	0.17	EN-ISO10370 ASTM D4530
Lubricidad, diámetro huella corregido (wsd 1.4) a 60° C	µm		460	251	EN-ISO12156-1
Contenido en agua	mg/kg		200	670	EN-ISO12937
Corrosión lámina de cobre (3h. a 50°C)	escala		Clase 1	1B	EN-ISO2160 ASTM D130
Transparencia y brillo				cumple	ASTM D4176
Volumen filtrado	ml			55	
Fluidez crítica	°C			-24	ASTM D97-15
Carbono	%			84,4	
Hidrógeno	%			13,9	
Nitrógeno	%			<0,01	
Oxígeno	%			1,73	
Poder Calorífico Superior	MJ/Kg			45,611	ASTM D240-14
Poder Calorífico Inferior	MJ/Kg			42,905	ASTM D240-14

Del estudio de la tabla anterior correspondiente a las analíticas del combustible obtenido por pirólisis de residuos plásticos se observa un valor alto de Índice de cetano, aunque téngase en cuenta que la fórmula de cálculo del índice de cetano es solo válida para destilados del petróleo. Los valores de densidad y viscosidad son bajos en comparación con la especificación para gasóleos. El punto de inflamación es prácticamente a temperatura ambiente. El contenido de agua triplica el máximo permitido por la norma.

2.3 MEZCLAS DE COMBUSTIBLE PROCEDENTE DE PIRÓLISIS Y GASÓLEO

Para evitar diversos daños en el motor, se decidió no introducir el combustible procedente de residuos plásticos al 100% de su composición, sino mezclado con EN590, y posteriormente, ir aumentando el contenido del mismo en función de los resultados monitorizados. En la siguiente tabla se recopilan todas las mezclas realizadas y el volumen disponible.

Tabla 2: Mezclas de combustible procedente del proceso de pirólisis y gasóleo

Denominación Muestra de Combustible	Porcentaje de mezcla de combustible	Volumen
EN-590(PIB)	100% V/V EN-590	20 litros
PI20B	20% V/V PIB + 80% V/V EN-590	5 litros
PI40B	40% V/V PIB + 60% V/V EN-590	5 litros
PI60B	60% V/V PIB + 40% V/V EN-590	5 litros
PI80B	80% V/V PIB + 20% V/V EN-590	5 litros
PI100B	100% V/V PIB	4 litros

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 GRUPO ELECTRÓGENO DE ENSAYO.

Los ensayos se realizan en las instalaciones del CETENMA, en concreto en la sala de ensayos del Laboratorio de Motores. En dicho laboratorio se encuentran todos los aparatos de medida y control necesarios, y cuyo recinto está diseñado con las respectivas medidas de seguridad, insonorización, resistencia estructural y resistencia al fuego.

El grupo de ensayo es un grupo electrógeno HYW-13 M5 de 13 kW de potencia con un motor YANMAR 3TNV88 y un alternador BCI 184 E de potencia 13 kW. Las características técnicas más importantes del grupo electrógeno de ensayo se recopilan en la siguiente tabla.

Tabla 3: Características técnicas del grupo electrógeno de ensayo

Fabricante	YANMAR
Modelo	3TNV88-GGE
Nº cilindros	3 en línea
Cilindrada	1.643,2 cm ³
Potencia máxima	13,2 kW a 1500 rpm
Relación compresión	19,1/1
Combustible	Diésel
Orden de encendido	1-3-2
Ciclo de operación	4T
Sistema de refrigeración	Circuito cerrado: motor-intercambiador, impulsión bomba motor.
Sistema de combustible	Inyección directa / Bomba en línea e inyectores
Válvulas	2 por cilindro

3.2 MEDIDA DE PARÁMETROS DEL MOTOR.

En los ensayos a realizar en banco de pruebas se llevaría a cabo un registro de las mediciones de los distintos parámetros de operación del motor del banco, en el cual se tienen instalados una serie de sensores y otra instrumentación para el registro de valores de los parámetros de interés durante los ensayos. Algunos de estos son esenciales para el cálculo de emisiones en los gases de escape, mientras que otros lo son para conocer las condiciones de operación del motor (prestaciones) y su comportamiento. Para obtener una buena medida, los instrumentos requieren estar correctamente calibrados en el momento de la realización del ensayo. Por lo tanto deben compararse periódicamente conforme a las indicaciones del procedimiento de registro general de instrumentos con patrones de medida conocidos y ajustarse convenientemente.

En la siguiente tabla se indican los parámetros medidos en el grupo electrógeno y la instrumentación utilizada.

Tabla 4: Instrumentación del banco de ensayos.

PARÁMETRO A MEDIR	UNIDAD DE MEDIDA	ERROR ADMISIBLE (de lectura)	EQUIPO DE MEDIDA	INCERTIDUMBRE CALIBRACIÓN (de lectura)
Presión atmosférica	mbar		TB-2102 N	±1
Temperatura	°C		LS N-37	±0,3
Humedad relativa	%		LS N-37	±5
Temperatura combustible	°C	±2	Termopar-T	±1
Consumo de combustible	g/min	±2	Célula carga	±1
Velocidad de giro del motor	rpm	±2 %	Sentron PAC Siemens	0'1 Hz

Potencia eléctrica	kW	±2 %	Sentron PAC Siemens	±0,1
Temperatura lubricante	°C	±15	Termopar-T	±1
Presión lubricante	bar	n/e		n/e
Temperatura entrada agua radiador	°C	±15	PT 100	±0,3
Temperatura salida agua radiador	°C	±15	PT 100	±0,3
Temperatura agua motor	°C	n/e	PT 100	±0,3
Temperatura aire admisión	°C	±2	PT 100	±0,3
Presión en colector admisión	°C	±5 %	Sensor de presión	±1,5%
Temperatura gases de escape	°C	±15	Termopar-K	±5
Contrapresión de escape	mbar	±5 %	Sensor presión	±1/5
Coefficiente absorción gases escape húmedos	m ⁻¹	n/e	Opacímetro MOTORSENS MAC 2012	±0,025

3.3 MEDICIÓN DE EMISIONES

Para la medida de emisiones del motor se emplea un analizador de gases de combustión testo 350-XL equipado con sensores de O₂, CO, NO y NO₂, , SO₂, CXHY, NO_x, CO₂ .

Los rangos de medida de las diferentes sondas instaladas son los siguiente:

Tabla 5: Rangos de medida

	RANGO	EXACTITUD	RESOLUCIÓN	TIEMPO RESPUESTA
O ₂	0 – 25 % Vol	±5 ppm (0 hasta +99 ppm)	1 ppm	30 s
CO	0 – 10000ppm	±10 ppm (0 hasta +199 ppm)	1 ppm	40 s
CO ₂	0 - 50 % Vol.	±0,3 % Vol. + 1 % del v.m. (0 hasta 25 % Vol.) ±0,5 % Vol. + 1,5 % del v.m. (25 hasta 50 % Vol.)	0,01 % Vol. (0 hasta 25 % Vol.) 0,1 % Vol. (> 25 % Vol.)	10 s
NO	0 – 300 ppm	±2 ppm (0 hasta +39,9 ppm)	±0,1 ppm	30 s
NO ₂	0 – 500ppm	±5 ppm (0 hasta +9,99 ppm)	0,1 ppm	40 s
SO ₂	0 – 5000ppm	±5 ppm (0 hasta +99 ppm)	1 ppm	30 s

4. PROGRAMA DE ENSAYOS, ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.

4.1 PROGRAMA DE ENSAYOS

Los ensayos se han realizado durante las fechas que se recogen en la siguiente tabla, en un motor de combustión diésel de 3 cilindros de aplicación a grupos electrógenos de 15 Kva.

Tabla 6: Programa de ensayos en motor diésel.

Ensayo	Muestra de combustible	Fecha	Porcentaje de carga ref. a nominal y velocidad de giro del motor
1	EN-590	12/07/2017	10%-25%-50%-75%-100% @ 1500 rpm
2	PI20B	11/09/2017	10%-25%-50%-75%-100% @ 1500 rpm
3	PI40B	12/09/2017	10%-25%-50%-75%-100% @ 1500 rpm
4	PI60B	12/09/2017	10%-25%-50%-75%-100% @ 1500 rpm
5	PI80B	13/09/2017	10%-25%-50%-75%-100% @ 1500 rpm
6	PI100B	13/09/2017	10%-25%-50%-75%-100% @ 1500 rpm

¹ Gasóleo A sin aditivar.

Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, por el que se determinan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes.

4.2 RESULTADOS

Una vez realizado los ensayos, se han recopilados todos los datos monitorizados en una serie de tablas. Estos datos han sido tratados, para detectar errores de lectura y también para realizar los cálculos necesarios para obtener resultados como por ejemplo las emisiones de gases en g/KWh.

Los datos recopilados en las tablas se clasifican según el % de contenido de combustible procedente de pirólisis de residuos plásticos.

A partir de estos resultados obtenidos, se han representado gráficamente los parámetros más significativos, como son el consumo específico frente a la presión media efectiva, la temperatura cilindro del cilindro 2 frente a la presión media efectiva, y por último, las emisiones de gases frente a la presión media efectiva.

4.3 TABLAS DE RESULTADOS

4.3.1 PI20B

Este ensayo se ha realizado con una muestra obtenida tras mezclar un 20% de combustible procedente de pirolisis de residuos plásticos con un 80% de EN-590.

Tabla 7: % de mezcla PI20B.

Denominación Muestra de Combustible	Porcentaje de mezcla de combustible	Volumen
PI20B	20% V/V PIB + 80% V/V EN-590	5 litros

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 8: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	-	1,9	3,5	6,8	10,1	12,8
Consumo	g/kWh	-	465,02	316,03	242,00	220,00	214,01
Tª ambiente	°C	-	23,618	23,910	23,845	23,285	23,706
Tª colector de admisión	°C	-	31,871	32,341	33,447	33,246	33,514
Tª aire despues compresor	°C	-	25,856	25,764	25,141	25,390	24,777
Tª escape colector	°C	-	157	189	272	352	444
Tª escape cil.1	°C	-	162	195	273	354	440
Tª escape cil.2	°C	-	160	193	269	348	434
Tª escape cil.3	°C	-	162	191	257	321	389

A continuación, se muestran todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

Tabla 9: Emisiones de gases en % y ppm

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	-	17,42	16,49	14,41	11,95	9,41
ppm CO	ppm	-	356,34	366,45	301,89	224,67	201,90
ppm NO	ppm	-	130,47	169,60	282,65	401,78	503,71
ppm HC	ppm	-	235,44	231,28	193,19	186,94	222,76
CO2	%	-	2,41	3,07	4,58	6,41	8,28
Nox	ppm	-	189,55	236,54	346,61	456,94	552,13

Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/kWh, se han realizado una serie de cálculos para obtener las siguiente tabla.

Tabla 10: Emisiones de gases en g/kWh.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/kWh	-	11,39	7,51	5,73	4,95	4,51
bs CO	g/kWh	-	13,59	7,47	3,17	1,54	1,04
bs HC1	g/kWh	-	4,56	2,41	1,05	0,67	0,61
bs CO2	g/kWh	-	1445,38	983,61	756,04	690,06	671,95

4.3.2 PI40B

Este ensayo se ha realizado con una muestra obtenida tras mezclar un 40% de combustible procedente de pirolisis de residuos plásticos con un 60% de EN-590.

Tabla 11: % de mezcla PI40B.

Denominación Muestra de Combustible	Porcentaje de mezcla de combustible	Volumen
PI40B	40% V/V PIB + 60% V/V EN-590	5 litros

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 12: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	-	1,9	3,5	6,8	10,0	12,8
Consumo	g/kWh	-	463,60	313,88	242,09	220,04	213,08
Tª ambiente	°C	-	23,241	22,889	23,102	23,131	24,317
Tª colector de admisión	°C	-	31,296	32,098	33,654	33,209	34,296
Tª aire despues compresor	°C	-	26,751	26,686	26,307	26,478	25,999
Tª escape colector	°C	-	156	189	275	354	450
Tª escape cil.1	°C	-	161	195	275	356	443
Tª escape cil.2	°C	-	159	192	269	351	438
Tª escape cil.3	°C	-	161	192	260	326	396

A continuación, se muestran todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

Tabla 13: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	-	17,43	16,50	14,41	11,92	9,32
ppm CO	ppm	-	391,98	401,35	329,61	249,42	219,72
ppm NO	ppm	-	130,36	171,25	286,17	396,92	499,18
ppm HC	ppm	-	262,61	255,29	217,71	204,77	244,69
CO2	%	-	2,39	3,04	4,55	6,40	8,33
Nox	ppm	-	194,23	244,70	352,34	458,18	549,30

Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/kWh, se han realizado una serie de cálculos para obtener las siguiente tabla.

Tabla 14: Emisiones de gases en g/kWh

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/kWh	-	11,64	7,69	5,76	4,88	4,42
bs CO	g/kWh	-	14,97	8,15	3,46	1,70	1,12
bs HC1	g/kWh	-	5,09	2,64	1,18	0,73	0,66
bs CO2	g/kWh	-	1431,27	970,44	750,92	685,00	664,46

4.3.3 PI60B

Este ensayo se ha realizado con una muestra obtenida tras mezclar un 60% de combustible procedente de pirolisis de residuos plásticos con un 40% de EN-590.

Tabla 15: % de mezcla PI60B.

Denominación Muestra de Combustible	Porcentaje de mezcla de combustible	Volumen
PI60B	60% V/V PIB + 40% V/V EN-590	5 litros

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 16: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	-	1,9	3,5	6,8	10,1	12,8
Consumo	g/kWh	-	469,77	314,03	238,44	219,57	213,03
Tª ambiente	°C	-	18,010	18,190	19,042	18,335	19,060
Tª colector de admisión	°C	-	27,533	28,482	29,575	29,193	29,702
Tª aire despues compresor	°C	-	23,563	23,483	23,192	23,354	23,053
Tª escape colector	°C	-	154	192	275	354	447
Tª escape cil.1	°C	-	159	195	274	356	439
Tª escape cil.2	°C	-	157	191	267	351	440
Tª escape cil.3	°C	-	157	191	258	323	395

A continuación, se muestran todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

Tabla 17: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	-	17,70	16,77	14,67	12,17	9,49
ppm CO	ppm	-	473,16	493,95	404,85	308,82	251,40
ppm NO	ppm	-	119,30	160,37	274,90	374,66	505,68
ppm HC	ppm	-	307,49	294,18	243,59	219,76	251,86
CO2	%	-	2,32	2,97	4,47	6,30	8,26
Nox	ppm	-	191,56	242,89	352,47	437,66	550,52

Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/kWh, se han realizado una serie de cálculos para obtener las siguiente tabla.

Tabla 18: Emisiones de gases en g/kWh

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/kWh	-	12,69	8,35	6,04	4,90	4,52
bs CO	g/kWh	-	18,81	10,26	4,26	2,13	1,28
bs HC1	g/kWh	-	6,20	3,12	1,32	0,79	0,69
bs CO2	g/kWh	-	1451,20	971,24	739,81	682,78	661,97

4.3.4 PI80B

Este ensayo se ha realizado con una muestra obtenida tras mezclar un 80% de combustible procedente de pirolisis de residuos plásticos con un 20% de EN-590.

Tabla 19: % de mezcla PI80B.

Denominación Muestra de Combustible	Porcentaje de mezcla de combustible	Volumen
PI80B	80% V/V PIAB + 20% V/V EN-590	5 litros

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 20: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	-	1,9	3,5	6,9	10,0	12,3
Consumo	g/kWh	-	472,03	314,17	227,26	218,25	212,21
Tª ambiente	°C	-	17,234	17,807	18,122	17,800	18,243
Tª colector de admisión	°C	-	27,078	28,057	27,990	29,817	30,047
Tª aire despues compresor	°C	-	24,041	23,997	23,573	23,825	23,664
Tª escape colector	°C	-	155	191	265	367	435
Tª escape cil.1	°C	-	162	195	274	361	430
Tª escape cil.2	°C	-	157	191	262	359	424
Tª escape cil.3	°C	-	158	190	255	330	381

A continuación, se muestran todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

Tabla 21: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	-	17,73	16,81	14,56	12,17	10,12
ppm CO	ppm	-	568,20	596,91	531,57	381,09	309,81
ppm NO	ppm	-	115,00	160,62	262,88	405,26	489,03
ppm HC	ppm	-	455,65	422,50	313,81	294,00	307,06
CO2	%	-	2,29	2,93	4,45	6,28	7,78
Nox	ppm	-	193,72	254,28	358,58	470,07	542,12

Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/kWh, se han realizado una serie de cálculos para obtener las siguiente tabla.

Tabla 22: Emisiones de gases en g/KWh

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/kWh	-	12,98	8,75	5,89	5,22	4,72
bs CO	g/kWh	-	22,84	12,49	5,29	2,60	1,66
bs HC1	g/kWh	-	9,28	4,50	1,61	1,05	0,87
bs CO2	g/kWh	-	1444,26	962,80	695,08	673,14	654,62

4.3.5 PI100B

Este ensayo se ha realizado con la muestra de combustible procedente de la pirolisis de residuos plásticos en su total composición, es decir, sin mezclarlo con EN-590.

Tabla 23: % de mezcla PI20B.

Denominación Muestra de Combustible	Porcentaje de mezcla de combustible	Volumen
PI100B	100% V/V PIB	20 litros

En la siguiente tabla aparecen recopilados los valores de potencia y consumo registrados, así como las temperaturas más significativas.

Tabla 24: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
Potencia	W	-	1,9	3,5	6,9	10,0	11,7
Consumo	g/kWh	-	473,54	315,40	217,18	215,32	210,71
Tª ambiente	°C	-	16,661	16,921	16,740	16,704	16,603
Tª colector de admisión	°C	-	26,458	27,370	26,694	28,885	29,460
Tª aire despues compresor	°C	-	24,163	24,165	23,897	23,894	23,857
Tª escape colector	°C	-	157	194	260	367	430
Tª escape cil.1	°C	-	163	198	273	363	431
Tª escape cil.2	°C	-	159	194	260	360	429
Tª escape cil.3	°C	-	160	193	256	330	388

A continuación, se muestran todos los datos registrados por el analizador de gases en % y ppm.

Tabla 25: Potencia, consumo y temperaturas.

CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
O2	%	-	17,82	16,87	14,54	12,26	10,18
ppm CO	ppm	-	739,47	786,99	731,55	507,81	411,78
ppm NO	ppm	-	101,19	145,95	272,09	473,39	581,62
ppm HC	ppm	-	675,47	622,81	469,60	386,25	409,07
CO2	%	-	2,22	2,87	4,36	6,17	7,70
Nox	ppm	-	187,88	250,58	392,13	552,33	652,27

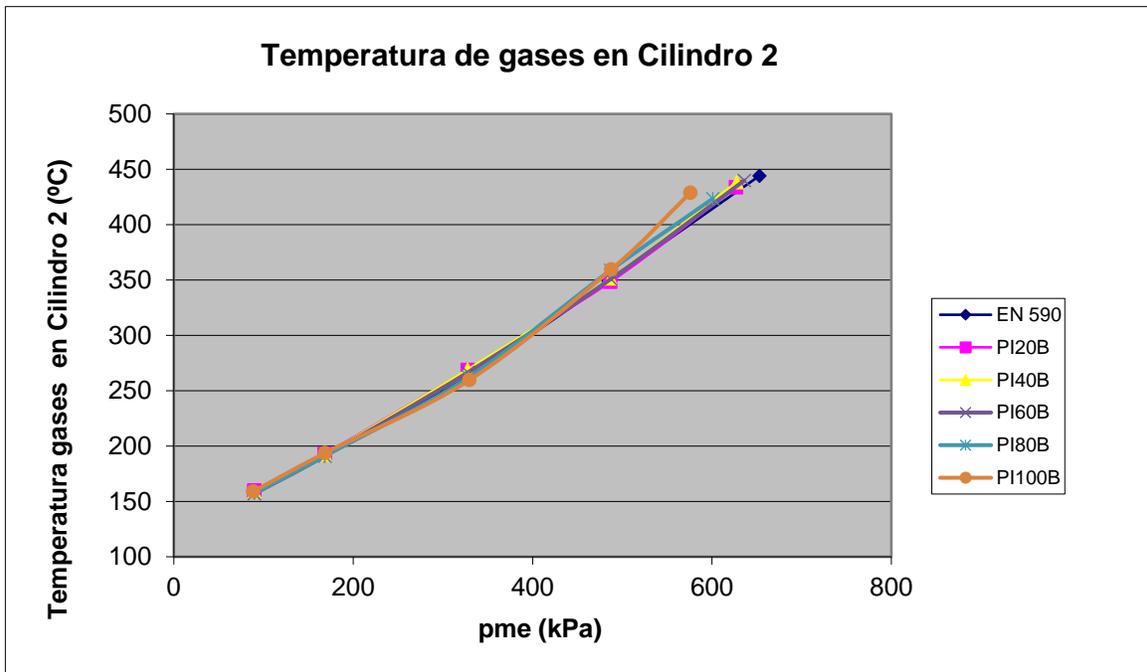
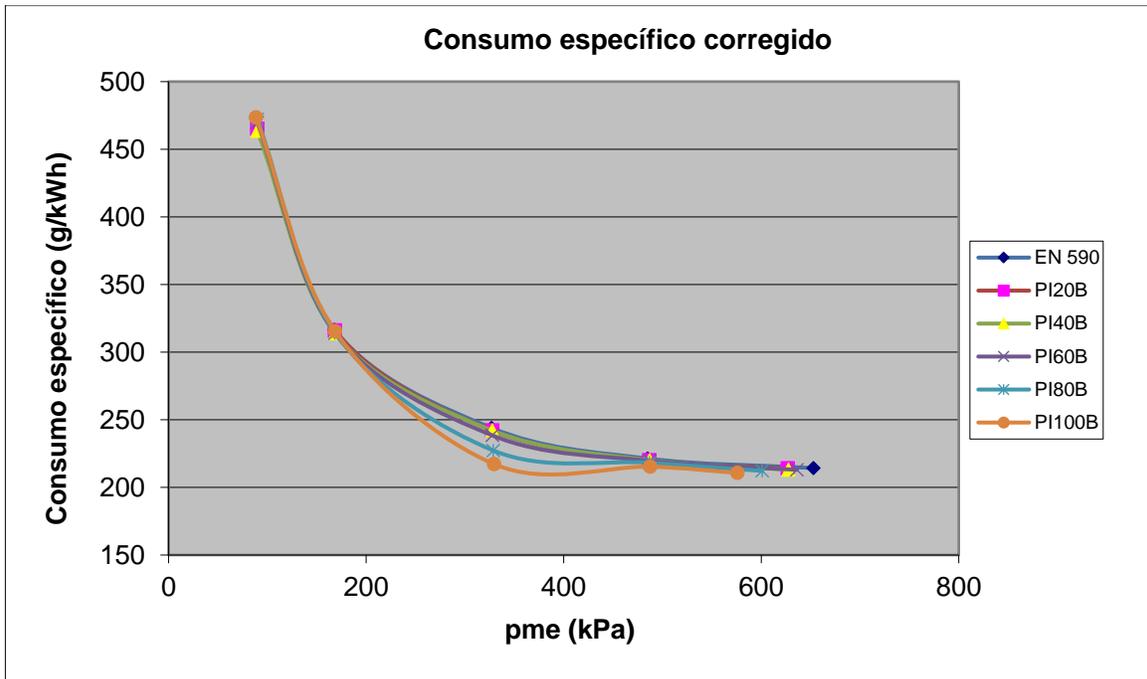
Debido a la importancia del valor de la emisión de los gases en g/kWh, se han realizado una serie de cálculos para obtener las siguiente tabla.

Tabla 26: Emisiones de gases en g/kWh

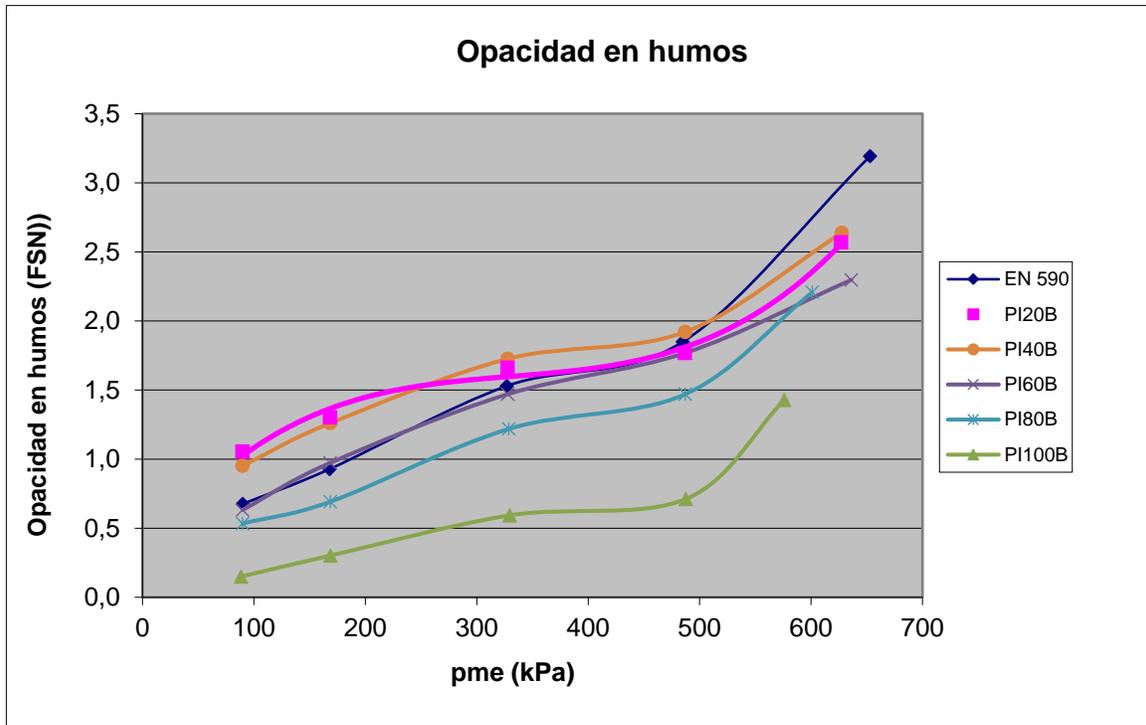
CARGA		0%	10%	25%	50%	75%	100%
bs NOx (ISO 8178)	g/kWh	-	12,35	8,65	6,18	6,12	5,59
bs CO	g/kWh	-	30,32	16,66	6,99	3,44	2,19
bs HC1	g/kWh	-	14,03	6,71	2,31	1,37	1,15
bs CO2	g/kWh	-	1431,32	955,58	653,83	657,46	643,74

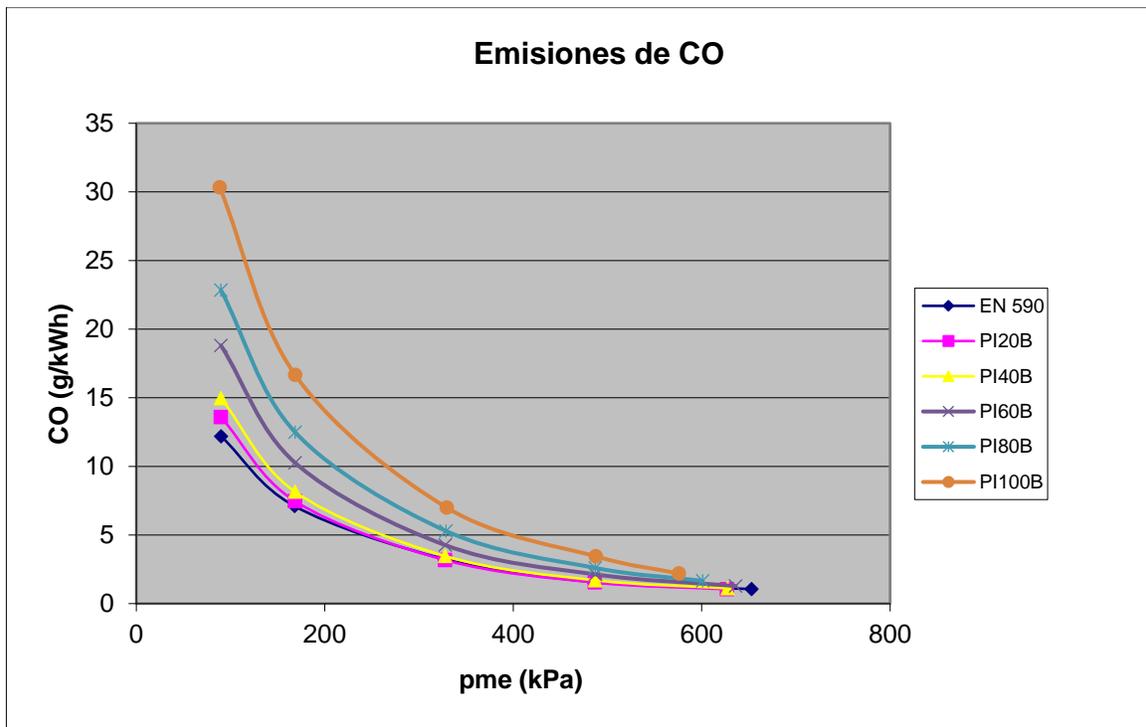
4.4 PRESTACIONES, CONSUMO Y EMISIONES DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLE PI100B Y EN 590.

En el gráfico de consumos específico con mezclas volumétricas de PI100B y EN-590 los consumos a altas cargas prácticamente permanecen constantes, al 50% de la carga se observa una ligera reducción de consumo. Los datos al 25% y 10% de la carga no son representativos porque se ha calculado con un consumo promedio ya que la medida en algunos casos no era fiable. Las temperaturas de gases de escape no varían en función de la diferente proporción de mezcla del PI100B con el EN-590.



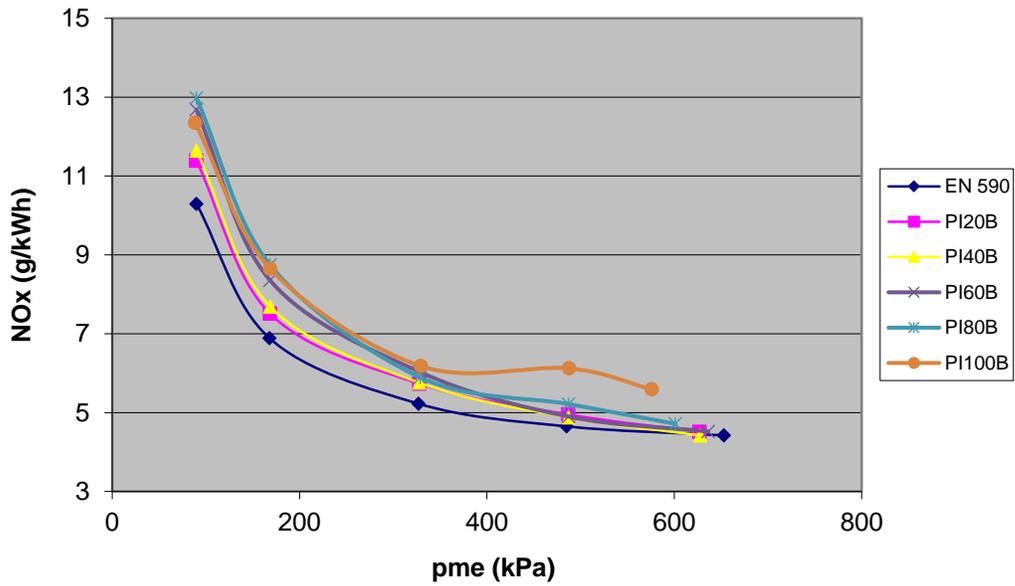
Como se observa en el gráfico de emisiones específicas de CO estas se incrementan conforme aumenta la proporción de PI100B en el combustible. Esta tendencia se observa en todos los grados de carga principalmente a partir del 75% de la carga, para mezclas inferiores al 40% de PI100B los valores de emisión de CO son iguales a los de EN-590. La opacidad de humos se empieza a reducir en comparación con el EN-590 para mezclas superiores a PI80B.



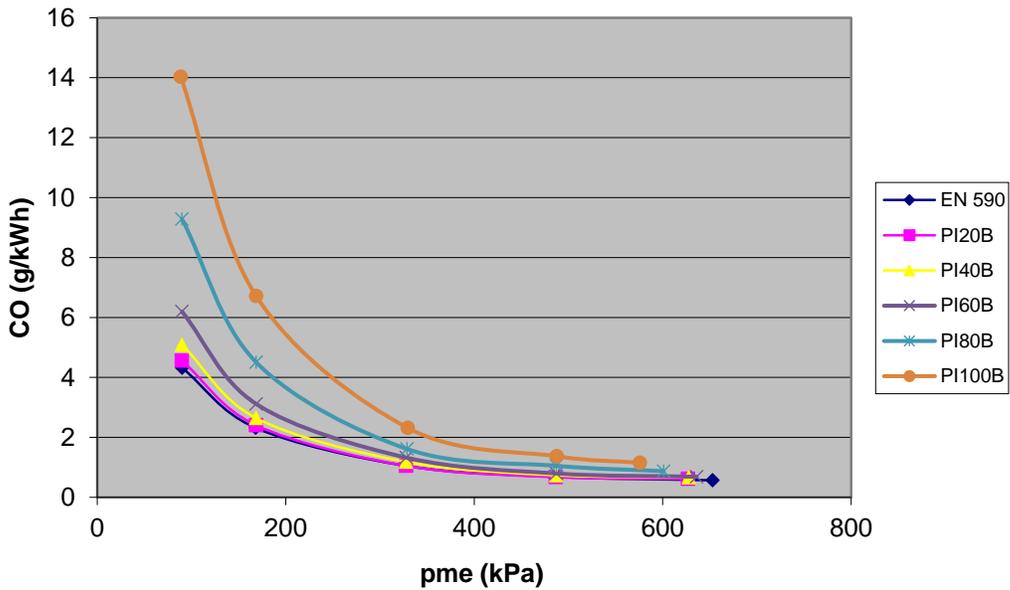


En las emisiones de HC la tendencia en las emisiones específicas de las mezclas es similar al caso del CO, a partir de mezclas del 60% en PI100B la formación de HC se incrementa de forma elevada. De igual forma a bajas cargas las emisiones de NO_x se incrementan, aunque en menor medida que las de CO y HC, prácticamente desde la mezcla al 20% de PI100B. A altas cargas se observa para el combustible de pirolisis un elevado valor de NO_x, esto puede ser debido a una mala medida de la concentración de NO_x en los gases de escape. Operando los valores promedio de los diferentes ensayos con muestras de PI100B obtenemos unos valores de NO_x de 5,2 g/kWh al 100% y de 5,4 g/kWh al 75%, estos resultados son más acordes con los mostrados en el gráfico.

Emisiones de NOx

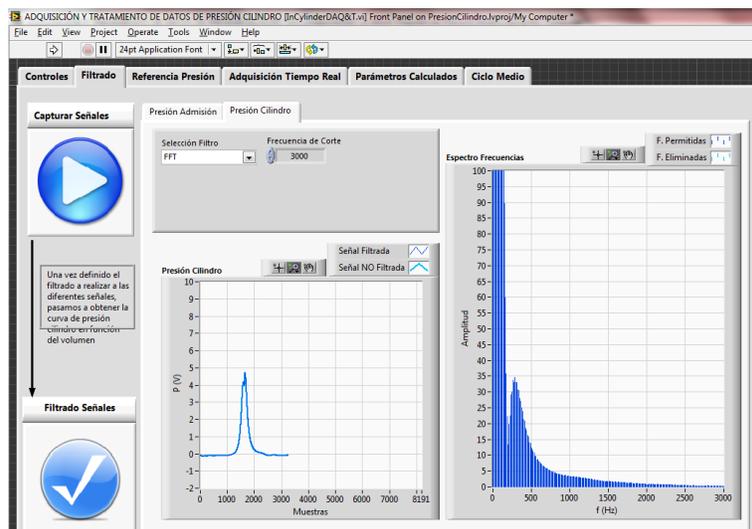
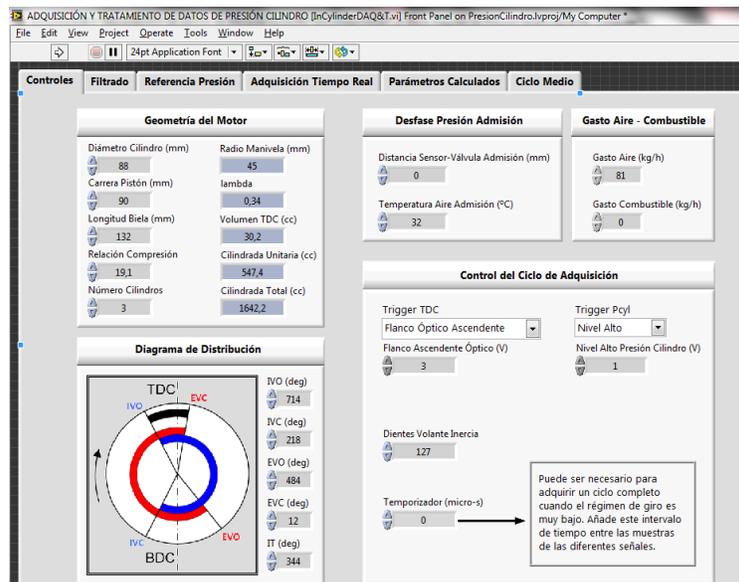


Emisiones de HC



5. REGISTRO DE DATOS PRESIÓN PISTÓN-CILINDRO

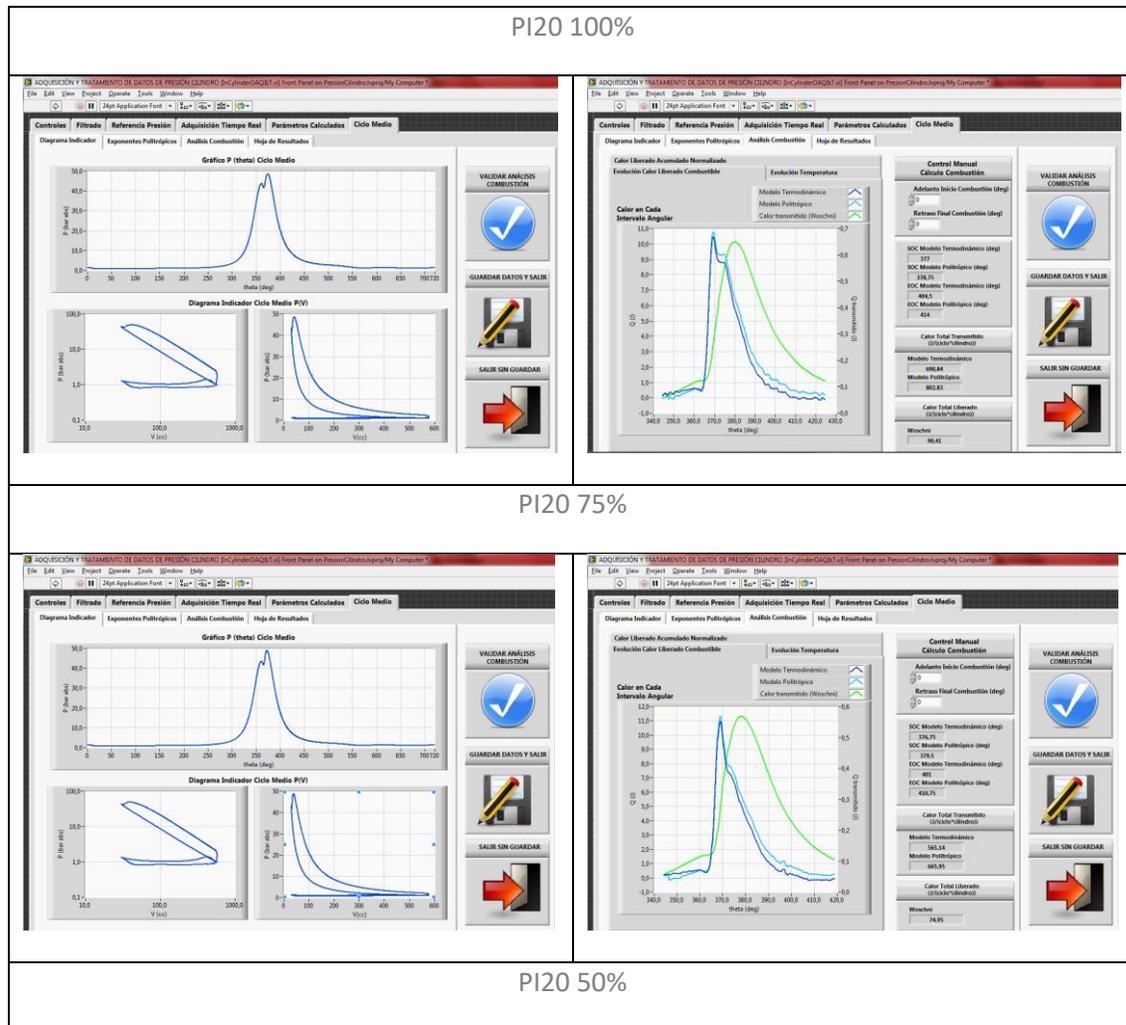
En las siguientes ilustraciones se muestran los datos de partida, que para todos los porcentajes de mezclas son los mismos.

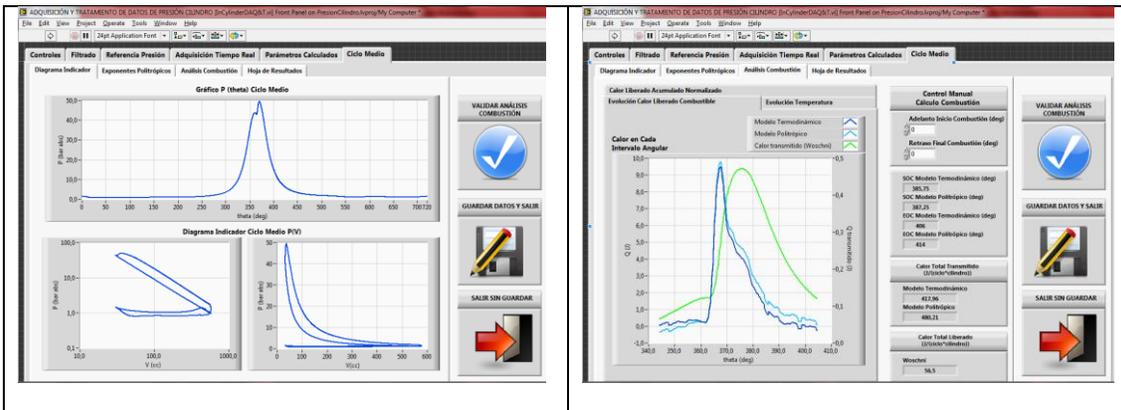


A continuación se hace una representación de la gráfica P(theta) ciclo medio, del diagrama indicador ciclo medio P(V) y de la evolución del calor liberado del combustible.

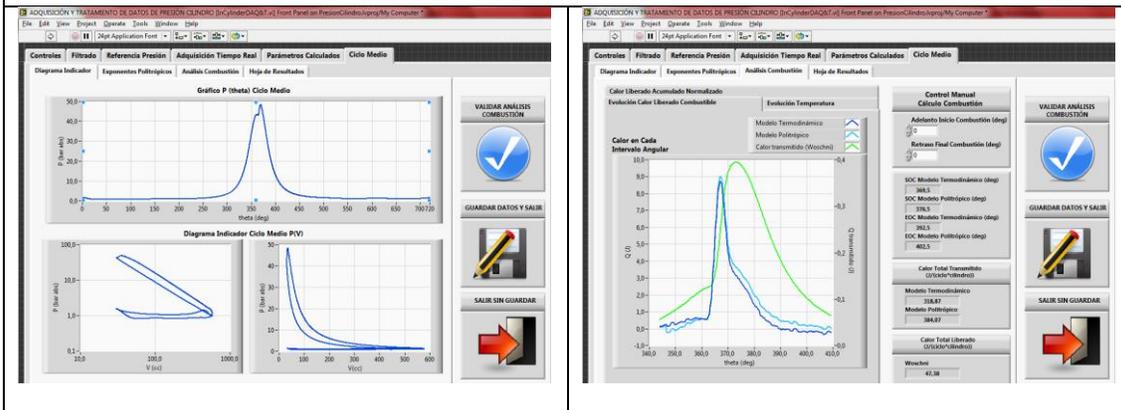
En el diagrama presión-volumen, se observa que cuanto mayor es el contenido en combustible procedente de la pirólisis de residuos plásticos, se produce un retraso en la combustión del mismo.

5.1 PI20B

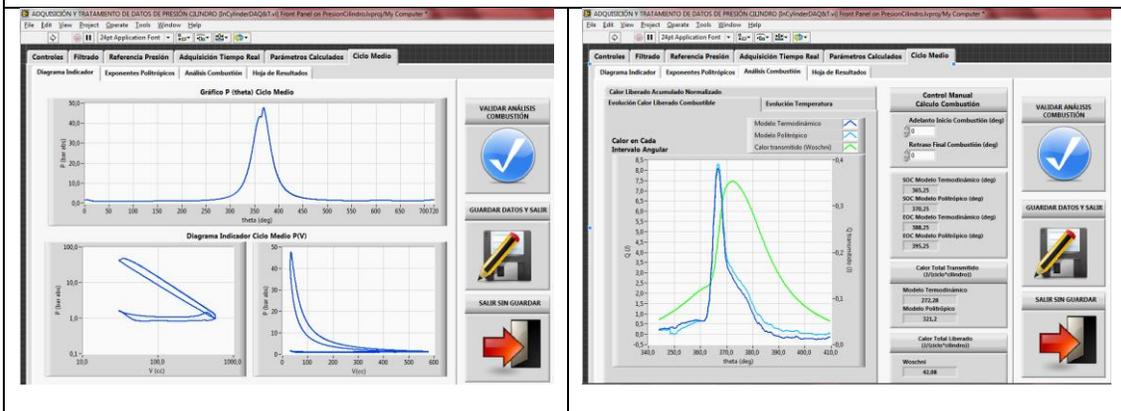




PI20 25%

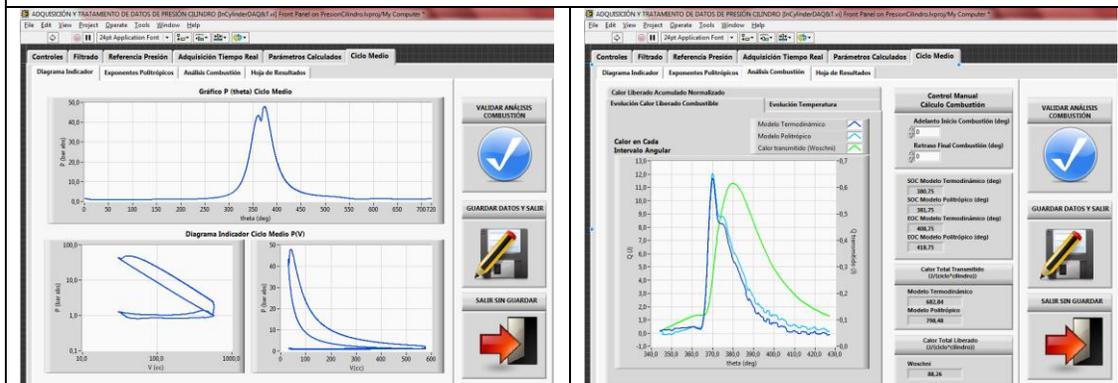


PI20 10%

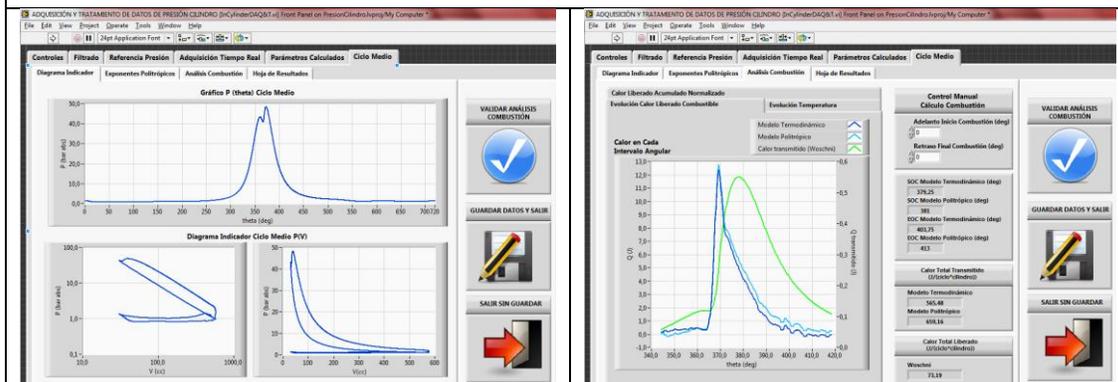


5.2 PI40B

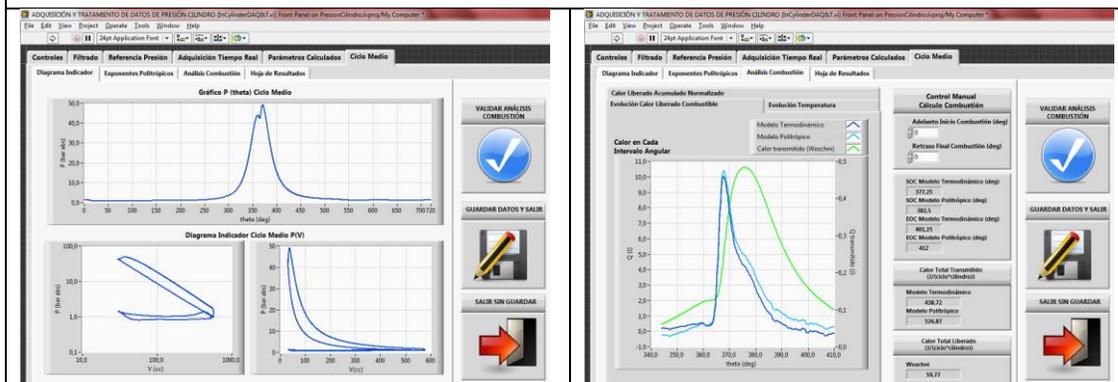
PI40 100%



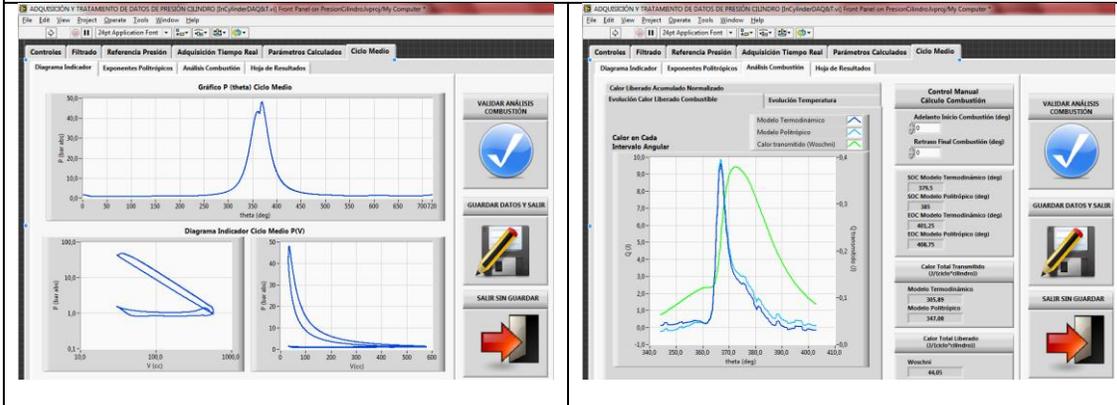
PI40 75%



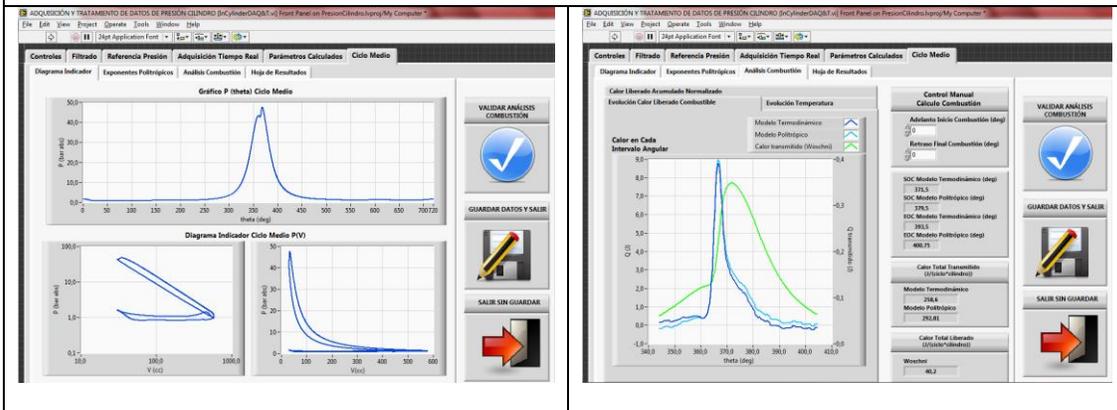
PI40 50%



PI40 25%

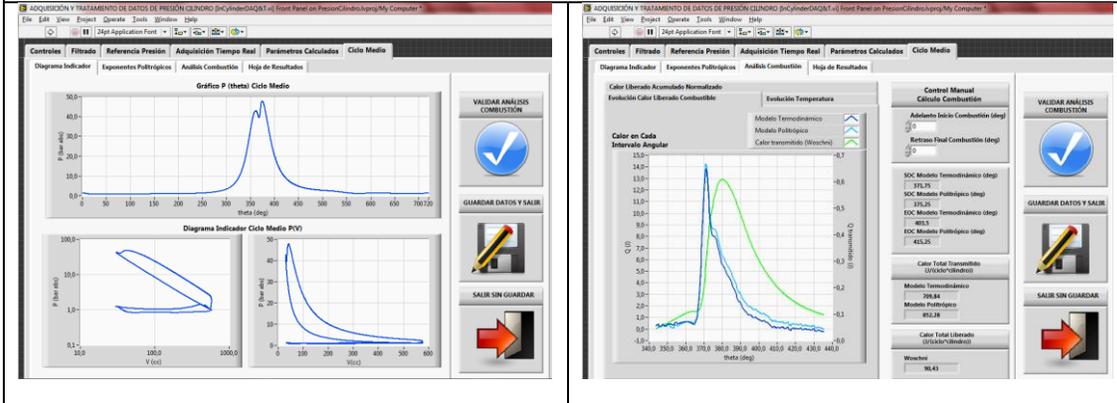


PI40 10%

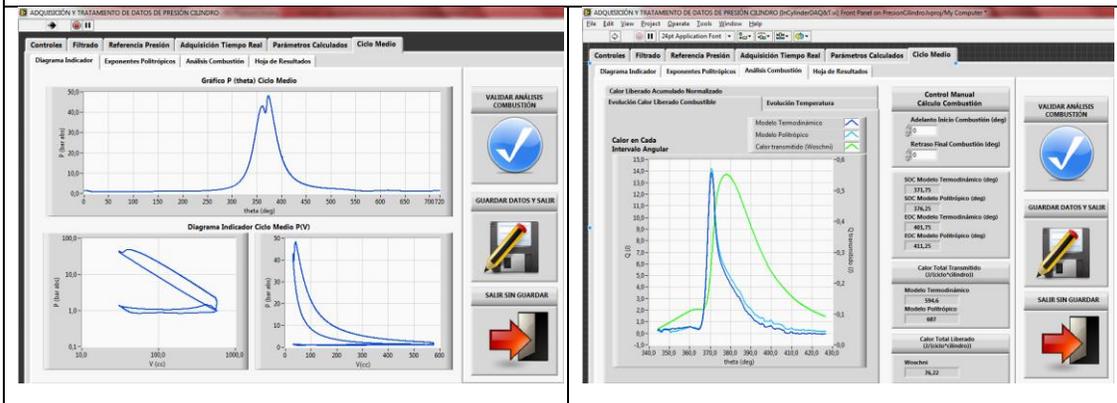


5.3 PI60B

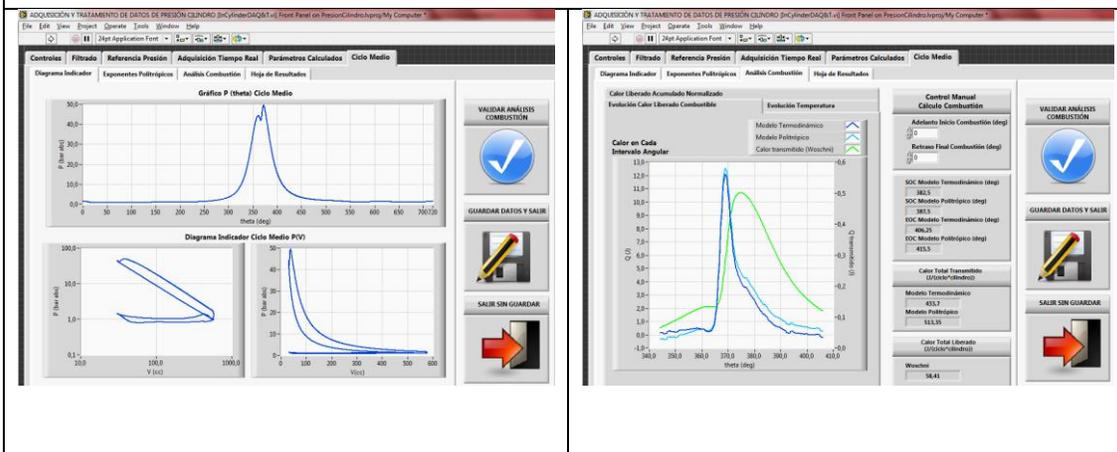
PI60 100%



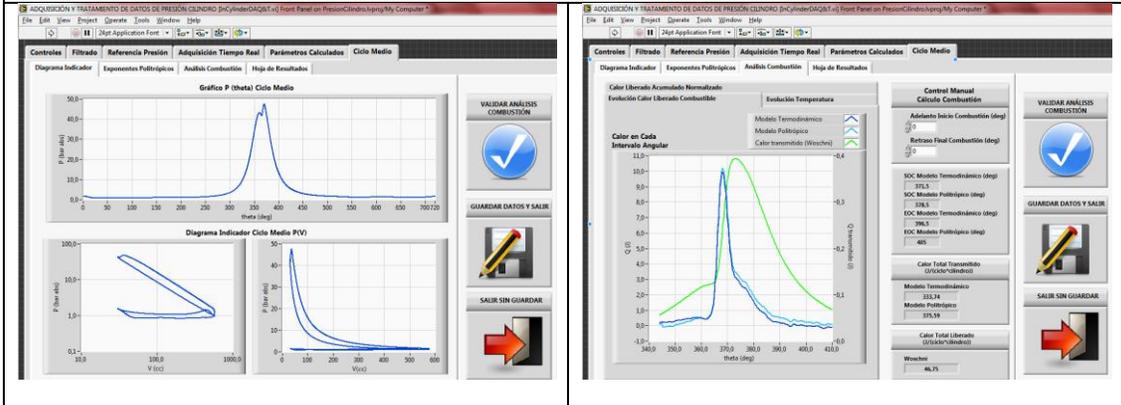
PI60 75%



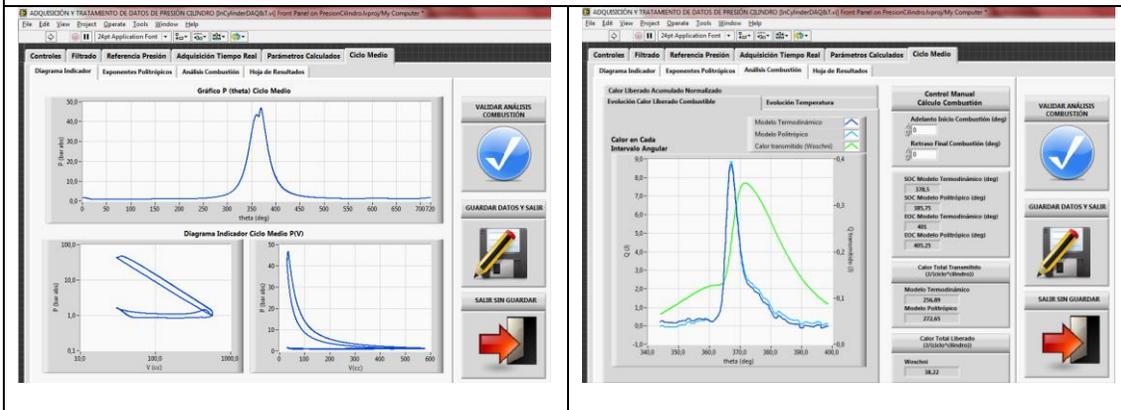
PI60 50%



PIGO 25%

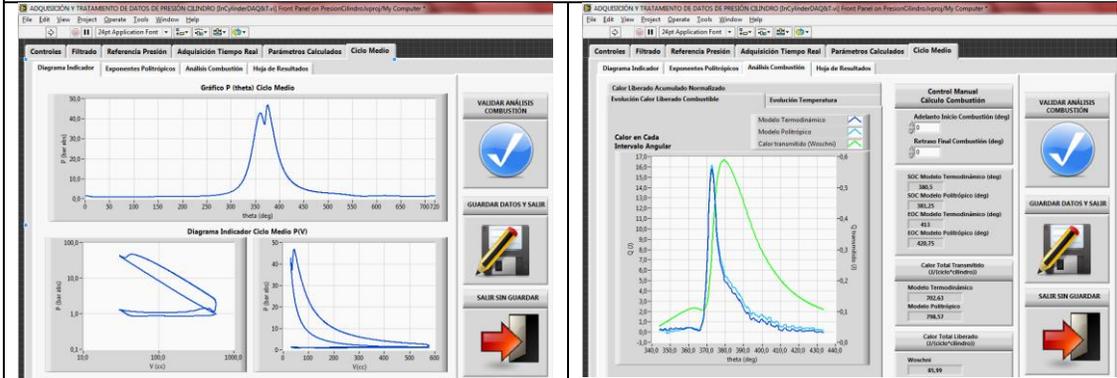


PIGO 10%

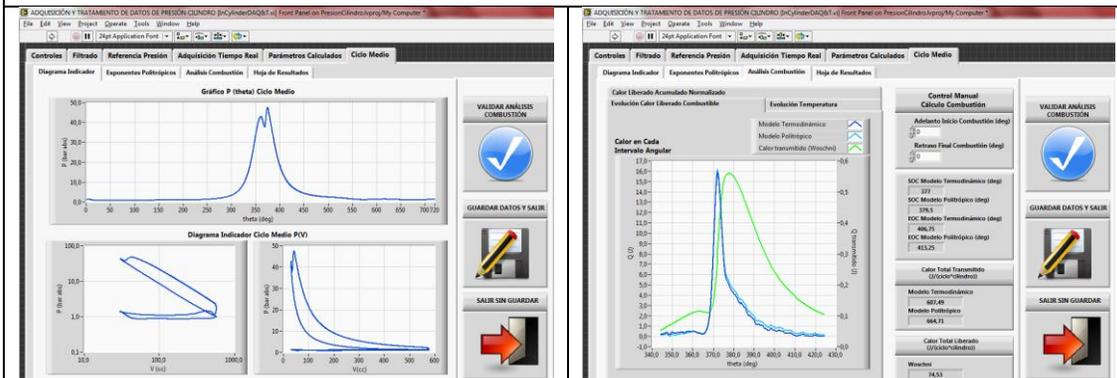


5.4 PI80B

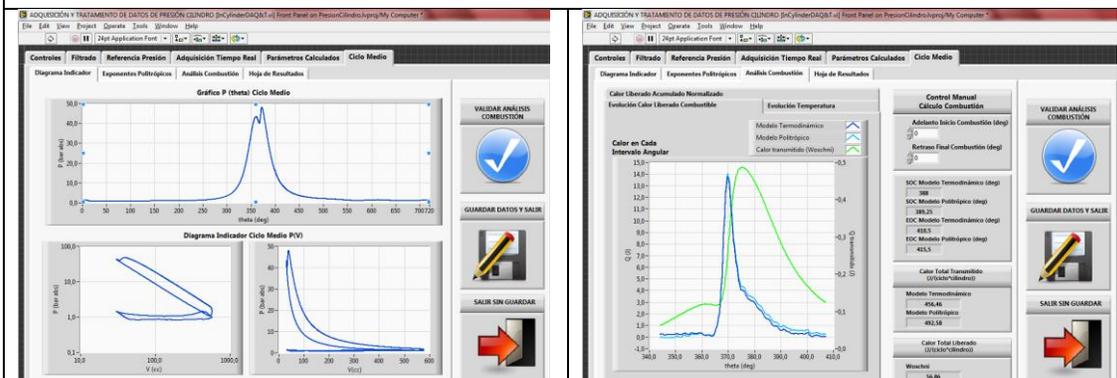
PI80 100%



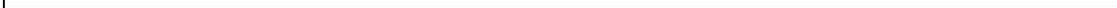
PI80 75%

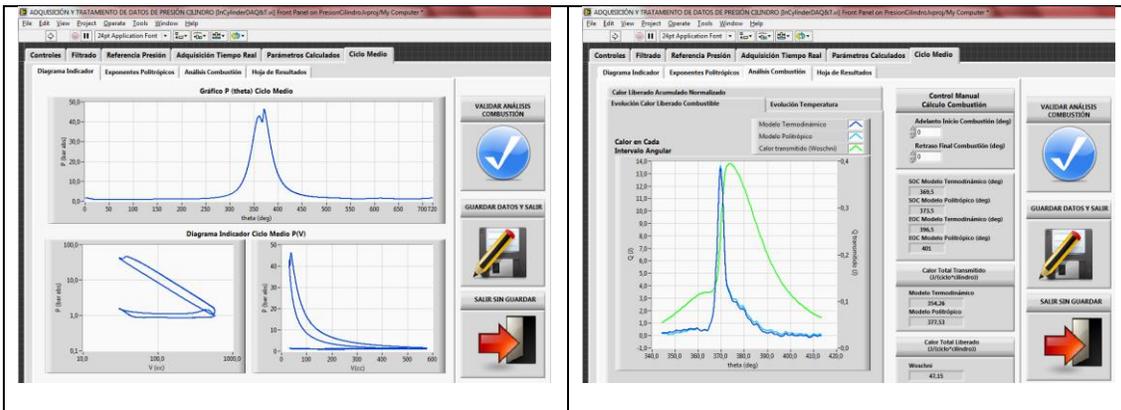


PI80 50%

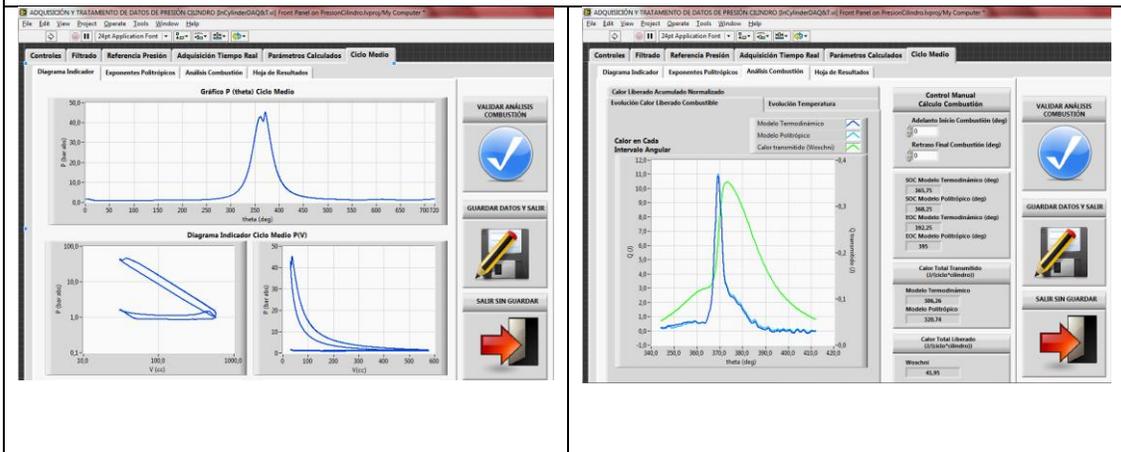


PI80 25%



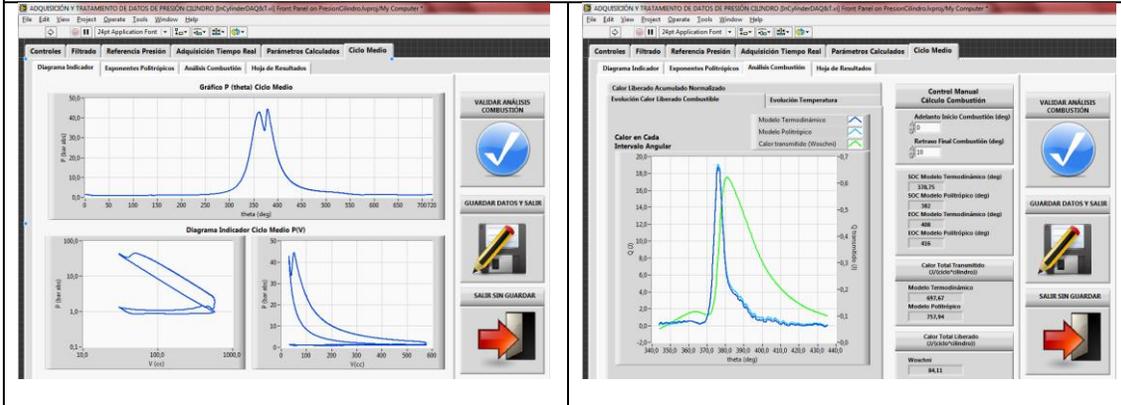


PI80 10%

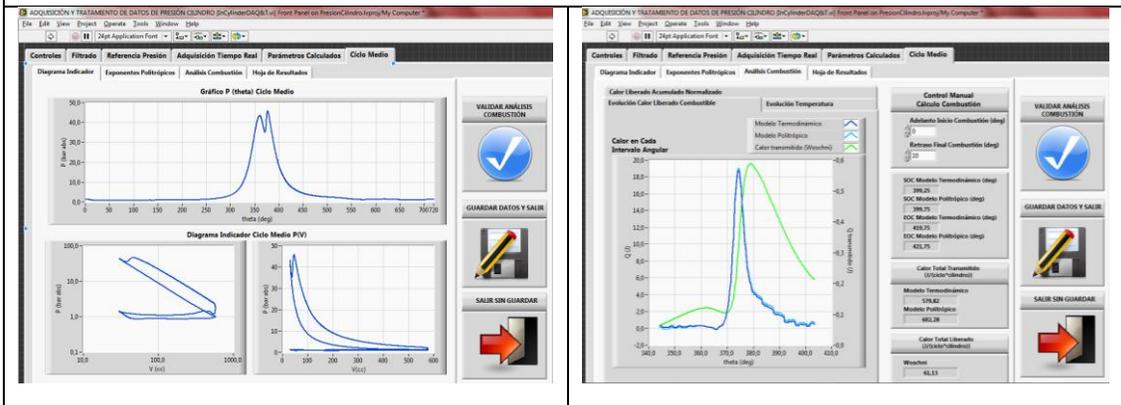


5.5 PI100B

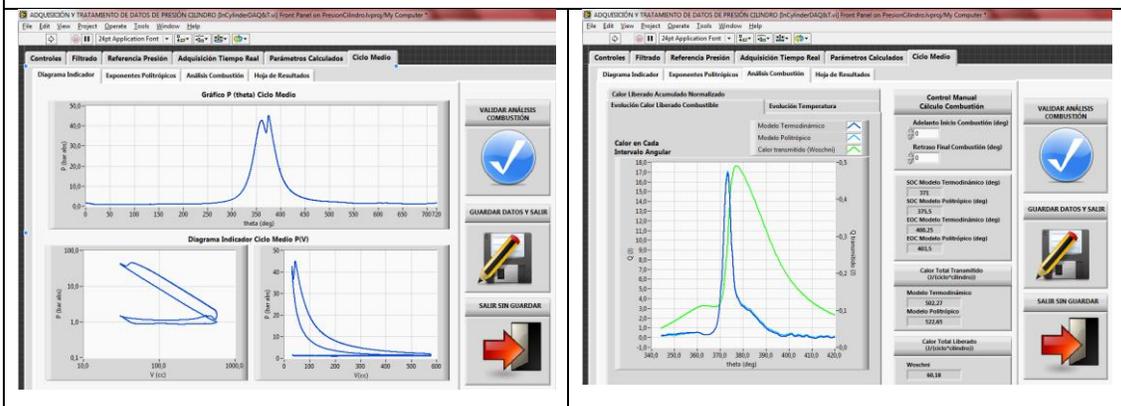
PI100 100%



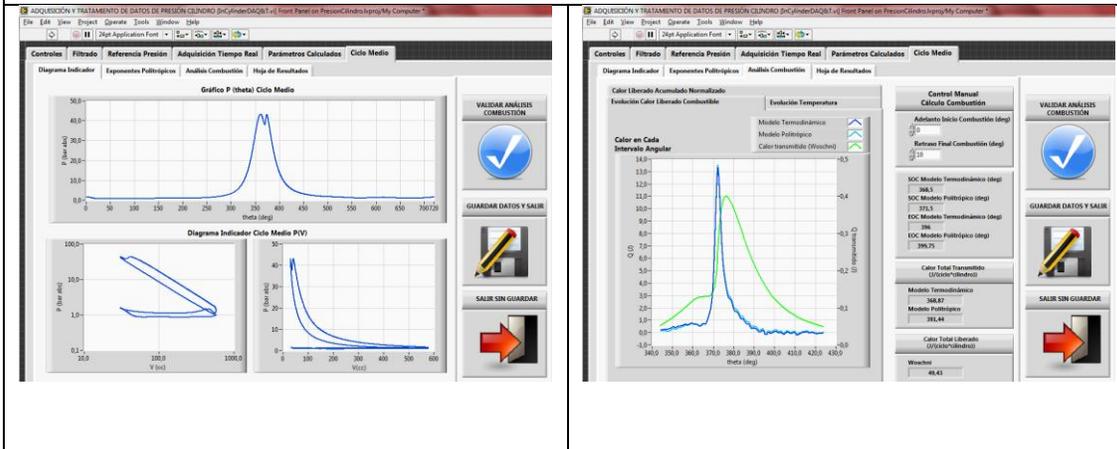
PI100 75%



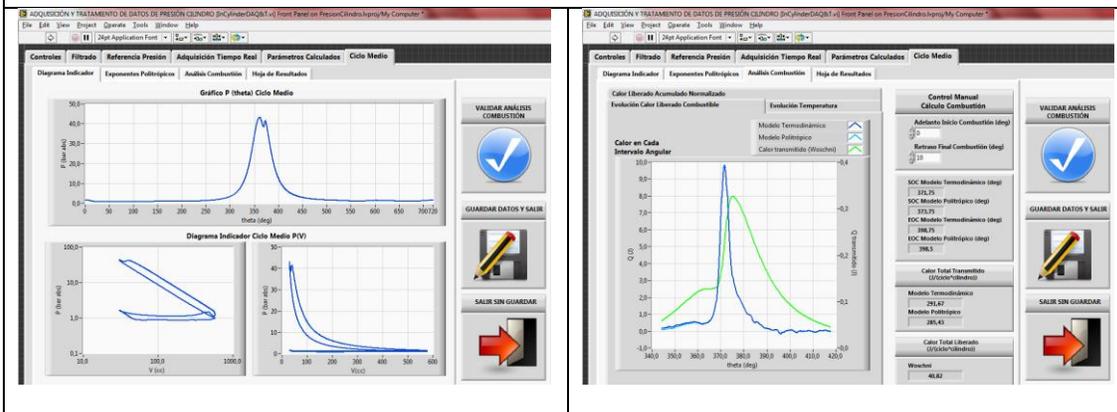
PI100 50%



PI100 25%



PI100 10%





Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente
Polígono Industrial Cabezo Beaza
C/ Sofía 6-13
30353 Cartagena (Murcia)

cetenma@cetenma.es

www.cetenma.es

T +34 968 52 03 61

F +34 968 52 01 34